



BIM et Rénovation : modélisation systémique de la transition numergétique en gestion de patrimoine immobilier

Laura Burneau

► To cite this version:

Laura Burneau. BIM et Rénovation : modélisation systémique de la transition numergétique en gestion de patrimoine immobilier. Réhabilitation. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LY-SET012 . tel-02481081

HAL Id: tel-02481081

<https://theses.hal.science/tel-02481081>

Submitted on 17 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N°d'ordre NNT : 2019LYSET012

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
I'ENTPE

École Doctorale N° 162
Mécanique Énergétique Génie Civil Acoustique

Spécialité : Thermique/Énergétique

Soutenue publiquement le 05/12/2019, par :
Laura Burneau

BIM et Rénovation :
Modélisation systémique de la
Transition Numergétique
en Gestion de Patrimoine Immobilier

Devant le jury composé de :

Toussaint, Jean-Yves	Professeur	UMR EVS / INSA Lyon	Président
Leclercq, Pierre	Professeur	LUCID, Université de Liège	Rapporteur
Sauce, Gérard	Docteur HDR	Polytech'Lab/Polytech Nice	
		Univ. Côte d'Azur	Rapporteur
Goffaux, Cécile	Docteure	CENAERO	Examinatrice
Guéna, François	Professeur	UMR MAP-MAACC	
		ENSA Paris La Villette	Examineur
Toussaint, Jean-Yves	Professeur	UMR EVS / INSA Lyon	Examineur
Michel, Pierre	Docteur HDR	LGCB, ENTPE, Université de Lyon	Directeur de thèse
Soubra, Souheil	Docteur	CSTB	Invité
Vinot, Benoît		CSTB	Invité

*“Not everything that counts can be counted,
and not everything that can be counted truly counts.”*

Albert Einstein

REMERCIEMENTS

Il me sera difficile d'exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui m'ont apporté leur aide précieuse et leur soutien dans ce travail de longue haleine. Aussi ma gratitude s'étend-elle bien au-delà de cette page... toutefois parmi les nombreuses personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à mener cette thèse à son terme, je tiens à remercier tout particulièrement :

Monsieur P.Leclercq, professeur à l'Université de Liège et Monsieur G.Sauce, maître de conférence à l'Université Côte d'Azur, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de ces travaux de thèse, ainsi que Madame C.Goffaux, responsable Développement et Innovation au Cenaero, Monsieur F.Guëna, professeur à l'ENSA Paris La Villette et Monsieur J.Y.Toussaint, professeur à l'INSA de Lyon, qui ont accepté d'en être les examinateurs.

Tous mes remerciements vont également aux équipes pédagogiques de L'École Doctorale MEGA et de l'ENTPE pour leur formidable travail d'accompagnement des doctorants et pour l'opportunité qui m'a été donnée d'assurer les modules de cours MSC, expérience gratifiante et ô combien instructive ! Je remercie tout particulièrement :

Messieurs L.Delattre et D.Dumortier, respectivement directeur de la recherche et de la formation doctorale et directeur du laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LGCB), pour le suivi de ces travaux de thèse lors des comités doctoraux et leur aval scientifique pour la poursuite de mes recherches.

Monsieur P.Michel chef du département Génie Civil et Bâtiment et directeur de ces travaux de thèse pour son appui tant sur le plan scientifique que personnel. Je suis fière de la complicité que nous avons tissée durant cette longue collaboration. et reconnaissante de la chance qui m'a été donnée de travailler à tes côtés.

Bien sûr ces travaux n'auraient pas vu le jour sans l'engagement et l'implication du CSTB. Je souhaite ici remercier chaleureusement :

F.Andrieux, directeur d'établissement de Sophia Antipolis, pour sa confiance lors du recrutement, ainsi que S.Soubra directeur des Technologies de l'Information et J.Soula chef de la division Maquette numérique et Ingénierie Concourante à Sophia Antipolis dont les thèmes de recherche théorique et appliquée ont fortement inspiré cette thèse.

B.Vinot chef de la division Systèmes d'Information et Applications Métier et co-encadrant de ces travaux, pour son soutien infaillible. Ta bienveillance et ta confiance en mes capacités ont été, toutes ces années durant, un véritable moteur dans l'aboutissement de cette thèse : merci pour ta douceur, ta générosité et ton dévouement. Merci également à M.Thorel ingénieur Recherche de la division SIAM, É.Rolland chef de projet Recherche et Expertise et G.Picinbono chef de projet MIC pour leur participation scientifique très appréciée et leur implication dans le suivi de mes travaux. Merci de m'avoir fait partager votre expérience et vos conseils, en répondant toujours avec beaucoup de gentillesse et d'indulgence à mes nombreuses questions.

Je salue bien sûr l'ensemble des équipes du CSTB, et en particulier celle de Sophia Antipolis qui m'a accueillie en son sein pendant toute la durée de mon cursus : à vous qui êtes trop nombreux pour être tous mentionnés dans ces quelques lignes, sachez que je n'oublie rien des rencontres et des événements qui ont rythmé l'histoire de ma présence parmi vous. À ceux qui sont devenus mes amis et ont rendu mon quotidien tellement enrichissant (tant d'un point de vue calorique que spirituel) : notre amitié m'a donné la force de relever bien des défis, et je garde un souvenir radieux des moments que nous avons partagés ensemble.

À ma famille enfin et à mes proches, qui ont fait preuve d'une patience infinie en des temps difficiles... Merci pour l'amour et la foi inébranlables que vous me témoignez sans relâche. Votre lumière est le plus grand des réconforts et le plus beau des cadeaux.

RESUME

Les transitions énergétique et numérique du secteur de la construction apparaissent comme deux évolutions sociotechniques majeures de notre siècle. Cette thèse a pour objet l'étude de leurs impacts mutuels et des conséquences de leur rencontre sur la performance globale du parc immobilier rénové.

Le modèle MACARON (Modèle d'Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique) présenté dans ces travaux considère quatre échelles spatiales assimilées à quatre échelles potentielles de la décision/action numergétique : i) l'utilisateur [NANO] ; ii) l'objet technique *bâtiment/parc homogène* [MICRO] ; iii) la cellule managériale de l'organisation [MESO] ; iv) l'objet technique *parc urbain hétérogène* [MACRO] et quatre thématiques transversales i) la performance énergétique ; ii) le déploiement du numérique ; iii) la capacité financière ; iv) la ressource humaine. Dans son avancement actuel, seules les échelles MICRO et MESO font l'objet de développements et d'analyses.

Suivant les principes de la modélisation systémique, notre contribution inclut l'identification des éléments d'interrelation entre performance énergétique et déploiement numérique. Ce travail, qui constitue la phase de conception/construction de notre système complexe, est suivi dans un second temps de l'exploitation du modèle laquelle comprend la construction d'alternatives contrastées de la stratégie numergétique de l'organisation gestionnaire et l'évaluation de leurs performances respectives dans l'amélioration du parc.

ABSTRACT

The energy and digital transitions of the construction sector and built environment appear as two major sociotechnical transitions of our century. This thesis aims to study their mutual impacts and the consequences of their meeting on the overall performance of the renovated building stock.

The MACARON model (Cost-Benefit Analysis Model of Digital-Oriented Renovation) presented in this work considers four spatial scales assimilated to four potential scales of numergetic decision / action: i) the user [NANO]; ii) the homogeneous building / estate as technical object [MICRO]; iii) the managerial cell of the organization [MESO]; iv) the heterogeneous urban estate as technical object [MACRO] and four cross-cutting disciplines i) energy performance; ii) digital deployment; (iii) financial capacity; iv) human resources. In current progress, only the MICRO and MESO scales are subject to development and analysis.

Using system dynamics, our contribution includes identifying the interactions between energy performance and digital deployment. This work provides the design and construction modeling stages of our complex system and the exploitation of the model. That includes the construction of contrasting alternatives of the managing organization numergetic strategy and the evaluation of their respective performance in improving the estate.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	5
RESUME	7
ABSTRACT.....	9
LISTE DES FIGURES	15
LISTE DES TABLEAUX.....	19
LISTE DES ÉQUATIONS	21
LISTE DES ANNEXES.....	25
INTRODUCTION	27

Première partie
Méthodologie

CHAPITRE 1

RENCONTRE DES TRANSITIONS ENERGETIQUE ET NUMERIQUE.....	31
1. TRANSITION ENERGETIQUE : POUR UNE CROISSANCE VERTE	33
1.1. <i>Trajectoire énergétique française</i>	33
1.2. <i>Enjeux et objectifs de la rénovation</i>	33
1.3. <i>Complexité de la rénovation urbaine</i>	34
2. TRANSITION NUMERIQUE : LA COURSE A L'E-SPACE.....	35
2.1. <i>BIM : l'acronyme aux trois visages</i>	35
2.2. <i>Complexité des évolutions technologiques</i>	42
3. TRANSITION NUMERGETIQUE : UNE QUESTION EPISTEMOLOGIQUE.....	43
4. RECONCILIER TRANSITION NUMERGETIQUE ET SCIENCES DE BIEN COMMUN	44
5. SYNTHESE DU CHAPITRE 1 : ECLAIRER LA DECISION COMPLEXE	45

CHAPITRE 2

BIM ET RENOVATION ENERGETIQUE : INVESTIGATION PAR LA SCIENCE DES SYSTEMES .	47
1. MODELISATION SYSTEMIQUE ET METHODES ASSOCIEES	49
1.1. <i>Analyse synthétique des principales méthodes de modélisation systémique</i>	49
1.2. <i>Sélection d'une méthode de modélisation</i>	53
2. OUTILS CONCEPTUELS DE L'APPROCHE SYSTEMIQUE	53
2.1. <i>Système</i>	54
2.2. <i>Complexité</i>	57
2.3. <i>Interaction dynamique</i>	57
2.4. <i>Globalité</i>	59
3. DEMARCHE DE MODELISATION SYSTEMIQUE	59
3.1. <i>Modélisation qualitative</i>	59
3.2. <i>Modélisation quantitative</i>	62
4. VALIDATION DES MODELES	65
5. SYNTHESE DU CHAPITRE 2 : CHOIX D'UNE METHODE SYSTEMIQUE.....	66

Deuxième partie Développements

CHAPITRE 3

LA TRANSITION NUMERGETIQUE : UN SYSTÈME COMPLEXE.....	69
1. DECOUPAGE SYSTEMIQUE : STRUCTURATION DE LA PROBLEMATIQUE.....	71
1.1. Analyse structurelle.....	71
1.2. Analyse fonctionnelle.....	76
1.3. Dimension temporelle.....	79
1.4. Objectifs de modélisation de MACARON.....	80
2. PERIMETRE DE L'ETUDE : INVESTIGATION DES ELEMENTS SYSTEMIQUES.....	81
2.1. Méthodes prospectives et matrices d'interdépendance.....	81
2.2. Investigation des éléments systémiques de MACARON.....	83
3. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 3 : DEMARCHE DE STRUCTURATION DU SORON.....	90

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE MACARON : NIVEAU MICRO.....	93
1. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU NIVEAU MICRO.....	95
1.1. Rappel des objectifs de modélisation du niveau MI.....	95
1.2. Paramètres de configuration du niveau opérationnel.....	97
2. MIPE – PERFORMANCE ÉNERGETIQUE.....	98
2.1. Diagramme causal synthétique (MIPE).....	98
2.2. Diagramme de flux (MIPE).....	100
3. MICF – CAPACITÉ FINANCIÈRE.....	104
3.1. Diagramme causal synthétique (MICF).....	104
3.2. Diagramme de flux (MICF).....	105
4. MIDN – DÉPLOIEMENT NUMÉRIQUE.....	108
4.1. Diagramme causal synthétique (MIDN).....	108
4.2. Diagramme de flux (MIDN).....	109
5. MIRH – RESSOURCES HUMAINES.....	115
5.1. Diagramme causal synthétique (MIRH).....	115
5.2. Diagramme de flux (MIRH).....	115
6. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 4 : FONDAMENTAUX DE LA SPHERE OPERATIONNELLE.....	120

CHAPITRE 5

DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE MACARON : NIVEAU MESO.....	121
1. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU NIVEAU MESO.....	123
1.1. Rappel des objectifs de modélisation du niveau ME.....	123
1.2. Paramètres de configuration du niveau décisionnel.....	126
2. MEPE – PERFORMANCE ÉNERGETIQUE.....	128
2.1. Diagramme causal synthétique (MEPE).....	128
2.2. Diagramme de flux (MEPE).....	128
3. MECF – CAPACITÉ FINANCIÈRE.....	132
3.1. Diagramme causal synthétique (MECF).....	132
3.2. Diagramme de flux (MECF).....	132
4. MEDN – DÉPLOIEMENT NUMÉRIQUE.....	137
4.1. Diagramme causal synthétique (MEDN).....	137
4.2. Diagramme de flux (MEDN).....	137
5. MERH - RESSOURCES HUMAINES.....	141
5.1. Diagramme causal synthétique (MERH).....	141
5.2. Diagramme de flux (MERH).....	143
6. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 5 : FONDAMENTAUX DE LA SPHERE DECISIONNELLE.....	151

Toisième partie

Analyse

CHAPITRE 6

EXPÉRIMENTATION DU MODÈLE.....	155
1. STRUCTURATION DE LA DEMARCHE D'EXPERIMENTATION.....	157
2. SCENARIOS D'EXPLOITATION ET PARAMETRES DE MACARON.....	158
2.1. <i>Sensibilité aux conditions initiales : SC0.....</i>	<i>158</i>
2.2. <i>Sensibilité à la stratégie de rénovation : SC1.....</i>	<i>164</i>
2.3. <i>Sensibilité à la stratégie de déploiement du BIM : SC2.....</i>	<i>166</i>
2.4. <i>Sensibilité à l'environnement BIM : SC3.....</i>	<i>169</i>
2.5. <i>Sensibilité à l'environnement énergétique : SC4.....</i>	<i>170</i>
2.6. <i>Comparaison de trois approches numergétiques contrastées : SC ELS.....</i>	<i>172</i>
3. ÉVALUATION DES RESULTATS DU MODELE : ELEMENTS D'ANALYSE QCD.....	173
4. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 6.....	175

CHAPITRE 7

EXPLOITATION DU MODELE.....	177
1. SCENARIO SC0 : PP-VV-VL.....	179
1.1. <i>Paramètres PP-VV-VL et causalités simplifiées.....</i>	<i>179</i>
1.2. <i>Analyse des résultats de SC0 : PP-VV-VL.....</i>	<i>183</i>
1.3. <i>Synthèse SC0 : choix d'une configuration du parc de logements.....</i>	<i>186</i>
2. SCENARIO SC1 : 1-E1Y-RT-MIX.....	187
2.1. <i>Paramètres RT-MIX et causalités simplifiées.....</i>	<i>187</i>
2.2. <i>Analyse des résultats de SC1 : E1Y-RT-MIX.....</i>	<i>189</i>
2.3. <i>Synthèse SC1 : choix d'une configuration de rénovation énergétique.....</i>	<i>199</i>
3. SCÉNARIO SC2 : E1Y-5I-FORM-LOD.....	200
3.1. <i>Paramètres FORM-LOD et causalités simplifiées.....</i>	<i>200</i>
3.2. <i>Analyse des résultats de SC2 : E1Y-5I-FORM-LOD.....</i>	<i>202</i>
3.3. <i>Synthèse SC2 : choix d'une stratégie numérique.....</i>	<i>212</i>
4. SCENARIO SC3 : E1Y-5I-1(0234)-T0-MAT.....	214
4.1. <i>Paramètres T0-MAT et causalités simplifiées.....</i>	<i>214</i>
4.2. <i>Analyse des résultats de SC3 : E1Y-5I-1(0234)-T0-MAT.....</i>	<i>216</i>
4.3. <i>Synthèse SC3 : choix d'un contexte numérique.....</i>	<i>225</i>
5. SCENARIO SC4 : E1Y-5I-1(0234)-21-DER-VV'.....	226
5.1. <i>Paramètres DER-VV' et causalités simplifiées.....</i>	<i>226</i>
5.2. <i>Analyse des résultats de SC4 : E1Y-5I-1(0234)-21-DER-VV'.....</i>	<i>228</i>
5.3. <i>Synthèse SC4 : conclusions sur le contexte énergétique.....</i>	<i>234</i>
5. SCENARIO ELS.....	235
5.4. <i>Paramètres ELS et causalités simplifiées.....</i>	<i>235</i>
5.5. <i>Analyse des résultats de ELS.....</i>	<i>236</i>
6. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS SUR SC ELS.....	248

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS, PERSPECTIVES.....	251
1. SYNTHÈSE GÉNÉRALE.....	253
2. PERFECTIONNEMENT DU MODELE : MACARON 1.....	254
2.1. <i>Scénarios d'analyse : augmenter le contraste des stratégies numergétiques.....</i>	<i>254</i>
2.2. <i>Boucles de rétroaction : complexifier les processus décisionnels.....</i>	<i>256</i>
3. ÉVOLUTION DU MODELE : MACARON 2.....	257
3.1. <i>Pistes de modélisation du niveau NANO : l'utilisateur.....</i>	<i>257</i>
3.2. <i>Pistes de modélisation du niveau MACRO : l'ensemble urbain.....</i>	<i>258</i>
4. MISE A PROFIT ET PRODUITS POTENTIELS DE MACARON.....	260
4.1. <i>MACARON PP : analyse des Politiques Publiques.....</i>	<i>260</i>
4.2. <i>MACARON ST : évaluation des Stratégies de Transition numergétique.....</i>	<i>260</i>
4.3. <i>À plus long terme.....</i>	<i>261</i>

BIBLIOGRAPHIE.....	263
---------------------------	------------

ANNEXES.....	269
---------------------	------------

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Échelles de visualisation BIM.	37
Figure 2. Level Of Detail, Level Of Information, Level Of Development. Illustration adaptée de (Celnik et al., 2015).	38
Figure 3. Cartographie du parc logiciel composant l'environnement BIM.	40
Figure 4. Modèle de maturité BIM de Mark Bew et Mervyn Richards, tiré de (Celnik et al., 2015).	41
Figure 5. Courbe Mac Leamy : impact du BIM sur les coûts de conception-réalisation d'un projet de construction.	42
Figure 6. Chemins de transition historique et contemporains selon (Papachristos, 2019).	43
Figure 7. Histoire de la naissance de la Dynamique de Systèmes Complexes : frise chronologique.	52
Figure 8. Modélisation systémique : étapes de la démarche. Illustration tirée de (Donnadieu et al., 2003).	54
Figure 9. Intrication de systèmes interpénétrés, illustration tirée de (Chu et al., 2003).	54
Figure 10. Système nerveux humain et système de guidage d'une arme à feu : illustration tirée de (Rosnay, 1979).	55
Figure 11. Niveaux de complexité selon Boulding et Le Moigne : structure complexe d'un système.	56
Figure 12. Rapports Force $\Rightarrow$ État, effets dans le système : illustrations extraites de (Rosnay, 1979) et (Karsky, 2004).	57
Figure 13. Boucles État $\Leftrightarrow$ Force, effets dans le système : illustrations extraites de (Rosnay, 1979) et (Karsky, 2004).	58
Figure 14. Principaux exemples de courbes de comportements dynamiques typiques en DSC.	58
Figure 15. Illustration tirée de (Rosnay, 1979) structure du système et réseaux de flux.	61
Figure 16. Représentation graphique d'un diagramme causal.	62
Figure 17. Représentation graphique d'un diagramme de flux.	63
Figure 18. Structure MLP (Papachristos, 2019) : boucles de renforcement et de perturbation dans les systèmes sociotechniques.	73
Figure 19. Structure système décide de Boulding/Le Moigne.	73
Figure 20. Adaptation personnelle des travaux de Boulding et Le Moigne à notre question complexe, sous la forme « système décide ».	75
Figure 21. The Ecosystem de (Rosnay, 1979) et notre adaptation personnelle : Le Numergystème.	76
Figure 22. Structure fonctionnelle du module PE.	77
Figure 23. Structure fonctionnelle du module CF.	77
Figure 24. Structure fonctionnelle du module RH.	78
Figure 25. Structure fonctionnelle du module DN.	78
Figure 26. Matrices d'Impacts Croisés de synthèse des modules (EP.CF.RH.DN).	84
Figure 27. Diagramme causal du niveau MICRO.	96
Figure 28. Diagramme causal MIPE.	99
Figure 29. Diagramme de flux MIPE.	100
Figure 30. Diagramme causal MICF.	104
Figure 31. Diagramme de flux MICF.	105
Figure 32. Diagramme causal MIDN.	108
Figure 33. Diagramme de flux MIDN.	109
Figure 34. Diagramme causal MIRH.	115
Figure 35. Diagramme de flux MIRH.	116
Figure 36. Diagramme causal du niveau MESO.	124

Figure 37. Diagramme causal MEPE.	128
Figure 38. Diagramme de flux MEPE.	129
Figure 39. Diagramme causal MECF.	132
Figure 40. Diagramme de flux MECF.	133
Figure 41. Diagramme causal MEDN.	137
Figure 42. Diagramme de flux MEDN.	138
Figure 43. Diagramme causal MIRH.	142
Figure 44. Diagramme de flux MERH.	143
Figure 45. Diagramme de flux partiel MERH : Allocation de la ressource humaine et expérience BIM.	144
Figure 46 Diagramme de flux partiel MERH : Gain de qualification BIM par la formation.	147
Figure 47. Incrémentation des scénarios d'exploitation de MACARON.	157
Figure 48. Consommation énergétique unitaire et distribution des 15 bâtiments par classe énergétique.	161
Figure 49. Coefficients d'attractivité appliqués dans MACARON (cf. annexe 1).	162
Figure 50. Comportement de référence τ vac national trend(t) : augmentation annuelle du taux de vacance national selon les chiffres INSEE (2018) ; Taux d'occupation du parc τ occ.(t) en situation de référence : le taux d'occupation du parc est soumis aux dynamiques de vacance constatées sur le territoire.	162
Figure 51. Évolution des exigences réglementaires/internes: synthèse des politiques énergétiques RT.	165
Figure 52. Données caractéristiques des LOD : contenus de données, adéquation aux activités, obsolescence des données et coûts de modélisation.	168
Figure 53. Maturité du BIM : courbes de pénétration marché.	170
Figure 54. Dérive du prix des énergies.	171
Figure 55. Trilemme Qualité-Coût-Délai.	174
Figure 56. Triangle de la Durabilité.	174
Figure 57. SC0 : Analyses de sensibilité PP-VV-VL.	179
Figure 58. Arbre des causalités simplifié SC0.	179
Figure 59. Synthèse des caractéristiques de PP : cartographies énergétiques, consommations énergétiques annuelles moyennes par m ² occupé et coefficient d'attractivité du parc associé.	181
Figure 60. Tableau des impacts de PP, VV, VL sur Econs(t), Rental income(t), τ occ.parc(t) les consommations énergétiques (kWhep), les revenus locatifs et le taux d'occupation du parc.	182
Figure 61. Econs(t) selon PP, VV=0 et VL=Y.	183
Figure 62. Capacité financière [€/m ² /loué/an] : sensibilité à PP-VV-VL.	185
Figure 63. Tableau de synthèse SC0 : choix d'une configuration du scénario de référence.	186
Figure 64. SC1 : Analyses de sensibilité RT-MIX.	187
Figure 65. Arbre des causalités simplifié SC1.	187
Figure 66. Tableau des impacts de RT et MIX sur Econs(t), attractiveness(t), mean Rcost/m ² (t) les consommations énergétiques (kWhep), l'attractivité du parc et le coût moyen des rénovations par unité de surface.	189
Figure 67. Inventaire final à (t=32) et attractivité annuelle moyenne du parc sur la période de simulation : sensibilité à RT.	191
Figure 68. Ecart relatif à SC0 des consommations cumulées de PP E en TWhep : sensibilité à RT- MIX.	191
Figure 69. Consommations TWhep/m ² moyennes annuelles et cumulées : sensibilité à RT-MIX.	192
Figure 70. Gains TWhecumac(t) : sensibilité à RT-MIX.	193
Figure 71. Gains TWhecumac(t=32) RT-I et RT-E : écart relatif à RT-R.	193
Figure 72. Ecart relatif à SC0 de la capacité financière [€/m ² /an] : sensibilité à RT-MIX.	194
Figure 73. Consommation des ressources humaines et financières : sensibilité à RT-MIX.	196
Figure 74. Consommation des ressources financières : sensibilité à RT-MIX.	196
Figure 75. Consommation des ressources humaines : sensibilité à RT-MIX.	197
Figure 76. Impacts relatifs de la non-qualité, approche globale : sensibilité à RT-MIX.	198
Figure 77. Synthèse RT-MIX : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations.	199

Figure 78. Tableau de synthèse SC1 : choix d'une configuration de rénovation énergétique.	199
Figure 79. SC2 : Analyses de sensibilité FORM-LOD.	200
Figure 80. Arbre des causalités simplifié SC2.	200
Figure 81. Tableau des impacts de FORM et LOD sur les consommations énergétiques (kWhep), le coefficient d'apprentissage de l'organisation et le taux de données non fiables.	201
Figure 82. Niveau de qualification BIM et temps de formation associés : sensibilité à FORM- LOD et impacts sur l'apprentissage organisationnel et les flux de gestion de données qui en découlent.	203
Figure 83. Qualité des flux de gestion de données, trouvabilité de l'information et impact sur la qualité des travaux : sensibilité à FORM-LOD.	204
Figure 84. Impact de la trouvabilité des données sur la qualité moyenne annuelle des rénovations : sensibilité à LOD.	205
Figure 85. Ecart relatif à SC0 et SC1 des consommations cumulées de PP E en TWhep et des gains TWhecumac(t=32) : sensibilité à FORM-LOD.	206
Figure 86. Capacité financière [€/m ² loué/an] : sensibilité à FORM-LOD.	207
Figure 87. Consommation de ressources financières pour les investissements : sensibilité à LOD.	208
Figure 88. Consommation de ressources financières pour les dépenses courantes EX et OP : sensibilité à FORM-LOD.	210
Figure 89. Consommation de ressources humaines pour les opérations numergétiques : sensibilité à FORM-LOD.	211
Figure 90. Impact de la non-qualité sur les volumes financiers et horaires investis par l'organisation : sensibilité à LOD.	212
Figure 91. Synthèse FORM-LOD : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations.	213
Figure 92. Tableau de synthèse SC2 : choix d'une stratégie numergétique.	213
Figure 93. Analyses de sensibilité T0-MAT.	214
Figure 94. Arbre des causalités simplifié SC3.	214
Figure 95. Tableau des impacts de T0 et MAT sur les consommations énergétiques (kWhep), le coefficient d'apprentissage de l'organisation et le taux de données non fiables.	215
Figure 96. BIM qualification(t) et Learning exponent(t).	216
Figure 97. Qualité des flux de gestion de données, trouvabilité de l'information et impact sur la qualité des travaux : sensibilité à T0-MAT.	217
Figure 98. Qualité des flux de gestion de données, trouvabilité de l'information et impact sur la qualité des travaux : sensibilité à T0-MAT.	218
Figure 99. Évolution de qR(t) l'indice de qualité des rénovations : sensibilité à T0-MAT.	219
Figure 100. Variation de l'indice de qualité des rénovations qR(t+1)-qR(t) : sensibilité à T0- MAT.	220
Figure 101. Ecart relatif à SC0 et SC2 des consommations cumulées en TWhep ; Ecart relatif à SC2 des gains TWhecumac(t=32) : sensibilité à T0-MAT.	221
Figure 102. Capacité financière [€/m ² loué/an] : sensibilité à T0-MAT.	222
Figure 103. Consommation de ressources financières et humaines pour les investissements : sensibilité à T0-MAT.	223
Figure 104. Consommation de ressources financières pour les dépenses courantes : sensibilité à T0-MAT.	224
Figure 105. Impact de la non-qualité sur les volumes financiers et horaires investis par l'organisation : sensibilité à T0-MAT.	224
Figure 106. Synthèse T0-MAT : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations.	225
Figure 107. Tableau de synthèse SC2 : choix d'une stratégie numergétique.	225
Figure 108. Analyses de sensibilité DER-VV'.	226
Figure 109. Arbre des causalités simplifié SC4.	226
Figure 110. Tableau des impacts de DER et VV' sur les consommations énergétiques (kWhep), les dépenses de maintenance et la facture énergétique annuelles.	227
Figure 111. Capacité financière [€/m ² loué/an] : sensibilité à DER-VV'.	228
Figure 112. Coût moyen des rénovations [€/m ² rénové] : sensibilité à DER-VV'.	229
Figure 113. Nombre de rénovations réalisées sur chaque bâtiment b=1 à b=15 du parc : sensibilité à LOD.	229

Figure 114. €/kWhep équivalent évité, comparaison au coût €/kWhep dépensé : sensibilité à DER.....	230
Figure 115. CF(t) et INV (R+BIM)cum(t=32): sensibilité à LOD en situation DER1-VV' N.	232
Figure 116. Temps de Retour Actualisé TRA(NumR) SC4 : sensibilité à DER-VV'	233
Figure 117. Synthèse DER-VV' : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations.	234
Figure 118. Analyses de sensibilité à ELS.	235
Figure 119. Arbre des causalités simplifié SC ELS.....	235
Figure 120. Inventaires des parcs E, L et S à t=32 et évolution des indices de qualité des rénovations.	237
Figure 121. Consommations énergétiques Econscurm(t) et résorption %Econscurm(t=32) par rapport à SC0.....	237
Figure 122. TWhcumac(t) et %TWhcumac(t=32) : écart relatif ELS/LOD0 ; écart relatif LS/E.	238
Figure 123. Impact de T0 sur les variations des flux de trésorerie CF(t).	239
Figure 124. Capacité financière [€/m ² loué/an] : sensibilité à ELS.	240
Figure 125. €/kWhep équivalent évité en E, L et S : comparaison au coût €/kWhep consommé.	241
Figure 126. Variation des volumes horaires et financiers de ELS LODx par rapport aux situations ELS LOD0.	242
Figure 127. Surcoûts de non-qualité du bouquet [R+MR] en €/m ² rénové.	244
Figure 128. Retard des rénovations (t) : excédent relatif % Y/X (heures).	245
Figure 129. Date des Temps de Retour Actualisés TRA (R), (NumR) et (N).	247
Figure 130. Synthèse ELS : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations et écart relatif à la meilleure valeur.	248
Figure 131. Estimation de l'impact de l'étiquette énergie (variation du prix en % par rapport à un appartement d'étiquette D – période 2012-2013, France métropolitaine). Carte extraite de (DINAMIC, 2015).	270
Figure 132. Coefficients d'attractivité appliqués dans MACARON	271
Figure 133. Courbe de tendance de prix pour différents LOD (acquisition comprise).	272
Figure 134. Proportion des LOD dans un modèle BIM global [%] et taux d'adéquation aux activités de GPI correspondants [Ø].....	273
Figure 135. Nombre d'attributs et taux d'obsolescence des LOD.....	274
Figure 136. Diagramme de flux du modèle de coûts.....	275

LISTE DES TABLEAUX

Table 1. Contenus de données des LODt. Tiré de (De Maestri, 2017) et (Celnik et al., 2015).	39
Table 2. Phases de projet associées aux LODt selon PAS 1192-2. Tiré de (De Maestri, 2017).	39
Table 3. Principales méthodes de modélisation intégrée dédiées à la modélisation des transitions et à l'aide à la décision.....	50
Table 4. Synthèse des caractéristiques de modélisation des méthodes systémique recensées.	50
Table 5. Fonctionnalités attendues de la plateforme de simulation pour nos besoins de modélisation.....	64
Table 6. Forces et limites des plateformes de modélisation DSC, extrait de (Elsawah et al., 2017).	64
Table 7. Synthèse des tests de validation <i>de base</i> en DSC, extraits de (Forrester and Senge, 1980).....	65
Table 8. Vision structurelle de MACARON : objets techniques, acteurs et éléments de paysage institutionnel considérés dans les objectifs de modélisation des échelles spatiales.....	74
Table 9. Tableau de synthèse des objectifs de modélisation par niveau et module de MACARON.	80
Table 10. Consultation des experts : processus itératif mis en œuvre pour l'analyse matricielle du SORON.....	83
Table 11. Éléments constitutifs retenus pour la construction des matrices d'interdépendance du SORON.....	84
Table 12. Synthèse des modules, niveaux et sous-modèles de MACARON	91
Table 13. Nomenclature des indices du modèle.....	91
Table 14. Nomenclature du diagramme de flux MIPE.	101
Table 15. Limites de classes énergétiques réglementaire et codification de $E_{class}(b,t)$	101
Table 16. Prix des énergies en 2017 en France métropolitaine ; Source : (MTES, 2012)	103
Table 17. Nomenclature du diagramme de flux MICF.	105
Table 18. Coûts moyens par poste de maintenance préconisés par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire pour le calcul en coût global des dépenses d'entretien.....	107
Table 19. Nomenclature du diagramme de flux MIDN.	109
Table 20. Nomenclature du diagramme de flux MIRH	116
Table 21. Nomenclature du diagramme de flux MIPE.	129
Table 22. Coût des rénovations [€/m ²] par saut de classe (Branger, 2015).....	130
Table 23. ΔkWh_{ep} par saut de classe.....	130
Table 24. Coût des rénovations [€/m ²] par kWh _{ep} selon saut de classe	130
Table 25. Coûts de rénovation des mix énergétiques [€/m ²] adaptés de (Branger, 2015).....	131
Table 26. Nomenclature du diagramme de flux MICF.	133
Table 27. Scénarios de tâches annuelles : missions 1(R), 2(C) et 3(M).....	136
Table 28. Nomenclature du diagramme de flux MEDN.	138
Table 29. Nomenclature du diagramme de flux partiel MERH (Figure 45)	144
Table 30. Variables de répartition des montants financiers alloués aux missions m.	145
Table 31. Tableau de répartition des volumes horaires alloués aux missions m.....	146
Table 32. Nomenclature du diagramme de flux partiel MERH (Figure 46).	148
Table 33. Coûts et durées des formations $training\ cost(t)$ et $training\ duration(t)$	148
Table 34. Préconisations recueillies auprès des experts CSTB en matière de formation BIM.	149
Table 35. Niveau de formation requis par type d'effectif : exemple en LOD300-400.	149
Table 36. Code de référencement commun pour l'identification des configurations d'analyse.	158
Table 37. Initialisation du modèle : profils de l'organisme gestionnaire et du parc.	159

Table 38. Cartographie des configurations SC0.	159
Table 39. Répartition des consommations unitaires : dimensionnement du parc PP.	160
Table 40. Paramétrage de VV : équations de $\tau_{occ}(b,t)$ et impacts de $attractiveness(b,t)$	163
Table 41. Montants (fourchettes des tarifs départementaux) de VL (X, Y, N) d'après l'Association CLAMEUR.	164
Table 42. Cartographie des configurations SC1.	165
Table 43. Configurations de MIX (Inchangé, Électrique, Renouvelable).	166
Table 44. Cartographie des configurations SC2.	167
Table 45. Cartographie des configurations SC3.	169
Table 46. Cartographie des configurations SC4.	171
Table 47. Impact de la performance énergétique sur les coûts de maintenance (VV')	172
Table 48. Cartographie des configurations E, L et S (Early majority, Late majority, Skeptic).	173
Table 49. Tableau récapitulatif des indicateurs et variables investigués dans l'exploitation du modèle.	175
Table 50. Tableau de synthèse des scénarios d'exploitation testés en chapitre 7.	176
Table 51. Caractéristiques des paramètres PP, VV et VL.	180
Table 52. Rappel des objectifs de simulation de SC0.	183
Table 53. Variation de l'occupation du parc : sensibilité à VV1 et VV4.	184
Table 54. Capacité Financière (CF) en €/m ² , dégagée de la location : sensibilité à VL.	185
Table 55. Caractéristiques des paramètres RT et MIX.	188
Table 56. Rappel des objectifs de simulation de SC1.	189
Table 57. Valeurs de référence pour Delayed requests(t=32) en configuration CN4-1R.	195
Table 58. Caractéristiques des paramètres PP, VV et VL.	201
Table 59. Rappel des objectifs de simulation de SC2.	202
Table 60. Rappel synthétique de la structure des postes de dépenses appliqués dans MACARON. ..	207
Table 61. Consommation des ressources financières : sensibilité à LOD.	209
Table 62. Caractéristiques des paramètres T0 et MAT.	215
Table 63. Rappel des objectifs de simulation de SC3.	215
Table 64. Coût moyen des rénovations par unité de surface rénovée : sensibilité à T0-MAT.	222
Table 65. Caractéristiques des paramètres DER et VV'	227
Table 66. Rappel des objectifs de simulation de SC4.	227
Table 67. Caractéristiques du Temps de Retour Actualisé TRA (NumR).	231
Table 68. Caractéristiques des Cash Flows CF(t) A, B, C et D.	231
Table 69. Rappel de la configuration des paramètres pour SC ELS.	236
Table 70. Rappel des objectifs de simulation de SC ELS.	236
Table 71. Caractéristiques des Temps de Retour Actualisés TRA (R), (NumR) et (N).	246
Table 72. Coefficient de variation de la valeur hors foncier du bâtiment rénové par saut de classe et zone thermique : green value(b,t)	271
Table 73. Prix/m ² moyen de modélisation de différents LOD.	272
Table 74. Coût de construction maquette et effort relatif par LOD.	273
Table 75. Contenu de données et proportion culée des LOD.	274
Table 76. Synthèse des caractéristiques des différents LOD dans MACARON.	274
Table 77. Nomenclature du diagramme de flux MIF.	276

LISTE DES ÉQUATIONS

Éq. 1	102
Éq. 2	102
Éq. 3	103
Éq. 4	106
Éq. 5	108
Éq. 6	108
Éq. 7	111
Éq. 8	111
Éq. 9	112
Éq. 10	112
Éq. 11	113
Éq. 12	113
Éq. 13	113
Éq. 14	113
Éq. 15	114
Éq. 16	114
Éq. 17	114
Éq. 18	117
Éq. 19	118
Éq. 20	118
Éq. 21	118
Éq. 22	119
Éq. 23	119
Éq. 24	130
Éq. 25	131
Éq. 26	134
Éq. 27	134
Éq. 28	135
Éq. 29	140
Éq. 30	141
Éq. 31	146
Éq. 32	146
Éq. 33	150
Éq. 34	150
Éq. 35	150
Éq. 36	151
Éq. 37	163
Éq. 38	163
Éq. 39	163
Éq. 40	171
Éq. 41	171
Éq. 42	171
Éq. 43	172
Éq. 44	172
Éq. 45	172

LISTE DES ACRONYMES

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AIA	American Institute of Architects
BBC	Bâtiment Basse Consommation
BIM	Building Information Model/ Modeling/ Management
BLM	Building Lifecycle Management
BSI	British Standard Institution
CAD	Computer-Aided Design
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CEREMA	Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CIREN	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
COBie	Construction Operations Building Information Exchange
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DCE	Document de Consultation des Entreprises
DOE	Dossier des Ouvrages Exécutés
DPE	Diagnostic de Performance Énergétique
DS(C)	Dynamique des Systèmes (Complexes)
ENR	Énergie Renouvelable
ENTPE	École Nationale des Travaux Publics de l'État
ETP	Équivalent Temps Plein
FEDENE	Fédération des Services Énergie et Environnement
GEM	Gestion Exploitation Maintenance
GES	Gaz à Effet de Serre
GPI	Gestion de Patrimoine Immobilier
HPE/THPE	Haute Performance Énergétique/Très Haute Performance Énergétique
IAI	International Alliance for Interoperability
IFC	Industry Foundation Class
IoT	Internet of Things
LOD	Level of Detail
LODt	Level of Development
LOI	Level of Information
MICMAC	Matrice d'Impacts Croisés
MNU	Maquette Numérique Urbaine
MOOC	Massive Open Online Courses
MVD	Model View Definition
OPE	Observatoire de la Performance Énergétique
PLM	Product Lifecycle Management
PNRU	Plan National de Rénovation Urbaine
PTNB	Plan de Transition Numérique du Bâtiment
RSET	Récapitulatif Standardisé d'Étude Thermique
TEPCV	Transition Énergétique pour la Croissance Verte
TPE/PME	Très Petites Entreprises/Petites et Moyennes Entreprises

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1

VALEUR VERTE ADAPTATION DE L'ETUDE (DINAMIC, 2015).....	270
1. LA VALEUR VERTE DES LOGEMENTS D'APRES LES BASES NOTARIALES BIEN ET PERVAL.....	270
2. ADAPTATION PERSONNELLE : <i>ATTRACTIVENESS(B,T)</i> , <i>GREEN VALUE(B,T)</i>	271

ANNEXE 2

CARACTERISTIQUES DES MODELES DE DONNEES BIM.....	272
1. PRIX D'ACQUISITION/MODELISATION DES DONNEES DU PARC	272
2. UTILITE DES LOD : EFFORT RELATIF ET TAUX D'ADEQUATION AUX ACTIVITES	273
3. NOMBRE D'ATTRIBUTS PAR LOD ET OBSOLESCENCE DES DONNEES.....	273
4. SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES LOD	274

ANNEXE 3

MODELE DE COUTS DE MACARON.....	275
1. DIAGRAMME DE FLUX	275
2. NOMENCLATURE	276

ANNEXE 4

PROFILS DES CONSOMMATIONS UNITAIRES AU SEIN DU PARC.....	277
1. RAPPEL DES HYPOTHESES INITIALES.....	277
2. PP A : REPARTITION LINEAIRE.....	277
3. PP B : REPARTITION EXPONENTIELLE	277
4. PP C : REPARTITION LOGARITHMIQUE	278
5. PP D : REPARTITION SIGMOÏDALE.....	278
6. PP E : DONNEES DU PARC SOCIAL	279

INTRODUCTION

Face aux enjeux planétaires du changement climatique, les chercheurs et scientifiques du monde entier se mobilisent pour dénoncer notamment l'impact du manque de sobriété et de durabilité de nos constructions existantes dans un contexte environnemental incertain.

En France, le parc bâti pèse lourd sur le bilan énergétique national : nos constructions représentent à elles seules près de 45% des consommations en énergie finale et 19% des émissions de GES totales du territoire (SOeS 2015). Une situation devenue inacceptable, tant pour la planète que pour ses occupants. Aussi le patrimoine immobilier existant fait-il l'objet de nombreuses décisions à échelle nationale, tels que le Plan de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (TEPCV, 2015) ou le Plan National de Rénovation Urbaine (PNRU, 2003), qui prônent et encouragent la rénovation des bâtiments existants : une transition qui nous demande de revoir notre système de valeur, d'évaluation, de prises en compte des conséquences humaines et environnementales.

Dans le même temps, le secteur de la construction présente des signaux faibles: stagnation de la productivité depuis l'après-guerre, consommation de ressources naturelles et d'espace, production de déchets. Comme l'aviation et l'automobile avant elle, mais avec le décalage dû à l'inertie réputée du secteur de la construction face aux changements organisationnels, au moins une partie des acteurs de la construction prône la numérisation des processus et des objets comme vecteur de qualité et d'innovation pour améliorer ces faiblesses. Qu'il fédère (autour des concepts de Lean Management entre autres) ou qu'il divise (sur des questions économico-financières notamment), le BIM, BIM Model, BIM Modeling ou BIM Management, est désormais au cœur des débats à toutes les échelles de décision et d'action : nationale, locale, interne... D'après (Boston Consulting Group (BCG) 2017) et (McKinsey 2017) le BIM collaboratif serait même actuellement la technologie la plus appropriée pour palier un certain nombre des freins actuels à l'amélioration globale du processus de construction.

Le BIM est en outre aujourd'hui largement promu en France par les instances. Si son adoption et sa mise en œuvre ne sont pas rendues obligatoires par le Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB) ni, plus récemment, par le Plan BIM 2022, les ambitions nationales montrent bien l'importance nouvelle accordée ces dernières années à l'utilisation des technologies de l'information dans les projets de construction avec par exemple une action intitulée « BIM pour tous » dans le PTNB, qui se poursuit dorénavant avec le Plan BIM 2022 dont l'objectif est également de généraliser l'utilisation du BIM dans le bâtiment.

Les enjeux de cette double transition énergétique et numérique du patrimoine bâti sont colossaux pour le secteur de la construction. Restée jusqu'alors très sectorisée par les corps de métier, la filière est aujourd'hui tenue de décroiser les supports et les méthodes pour garantir une expertise transversale et collaborative de la durabilité de nos constructions.

S'il existe une littérature riche sur les enjeux technologiques et économiques du BIM, rares sont les études et les modèles quantitatifs et prospectifs à investiguer la question numérique et les impacts croisés de cette double transition sous l'aspect organisationnel. Dans un esprit voulu critique, original et innovant, on questionne la nouvelle souveraineté du numérique et interrogeons l'impact de ce tournant majeur de l'histoire de la construction : existe-t-il une possible transition numérique, associant pour le mieux l'orientation numérique et objectifs d'amélioration énergétique ? Quelles sont les caractéristiques et les conséquences d'une telle conjonction et quel(s) futur(s) possibles pour la rénovation BIM-centrée ?

Ainsi cette thèse s’empare-t-elle de la Dynamique des Systèmes Complexes pour explorer les mécanismes endogènes et les paramètres exogènes qui sont à l’origine de différents chemins de transition numergétique. Notre vision du Système Objet de la Rénovation Orientée Numérique (SORON) s’inspire du profil économique, technique et managérial de l’organisation gestionnaire de patrimoine immobilier, pièce maîtresse de la conception/construction/rénovation durables.

La première partie de ce mémoire - Méthodologie – introduit notre question de recherche. Cette partie positionnera le contexte de notre problématique dans le chapitre 1, et mettra en évidence en chapitre 2 les matériels, outils et méthodes utiles au traitement des enjeux soulevés.

Une deuxième partie - Développements - est consacrée à la présentation scientifique du modèle MACARON : Modèle d’Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique. Le périmètre du travail de recherche et le détail de notre démarche méthodologique seront présentés en chapitre 3. Les chapitres 4 et 5 détaillent la démarche employée pour la modélisation de deux échelles spatiales, les niveaux MICRO (l’objet technique) et MESO (l’organisation).

La troisième et dernière partie - Analyse - se compose du chapitre 6 où l’on expose notre démarche d’exploitation de MACARON, du chapitre 7 dédié à l’analyse critique du modèle et des résultats et enfin du chapitre 8 dans lequel nous proposerons plusieurs pistes d’évolution du modèle et un ensemble de perspectives d’exploitation de ses résultats.

PREMIERE PARTIE

————— Méthodologie —————

CHAPITRE 1

RENCONTRE DES TRANSITIONS ENERGETIQUE ET NUMERIQUE

« La forme n'est qu'un instantané pris sur une transition. »

Henri Bergson

1. TRANSITION ENERGETIQUE : POUR UNE CROISSANCE VERTE	33
1.1. TRAJECTOIRE ENERGETIQUE FRANÇAISE	33
1.2. ENJEUX ET OBJECTIFS DE LA RENOVATION	33
1.3. COMPLEXITE DE LA RENOVATION URBAINE	34
2. TRANSITION NUMERIQUE : LA COURSE A L'E-SPACE	35
2.1. BIM : L'ACRONYME AUX TROIS VISAGES	35
2.1.1. <i>BIM Model</i>	36
2.1.2. <i>BIM Modeling</i>	39
2.1.3. <i>BIM Management</i>	40
2.2. COMPLEXITE DES EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES	42
3. TRANSITION NUMERGETIQUE : UNE QUESTION EPISTEMOLOGIQUE	43
4. RECONCILIER TRANSITION NUMERGETIQUE ET SCIENCES DE BIEN COMMUN.....	44
5. SYNTHESE DU CHAPITRE 1 : ECLAIRER LA DECISION COMPLEXE	45

Le plan de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (TEPCV) et le Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB), auquel a été substitué le Plan BIM 2022, constituent l'ossature de la transition numérgétique française. Conjointement, ils sont de force à modifier profondément les processus de construction, tant dans leur forme (interopérabilité, vision systémique) que dans leur fond (priorisation, évaluation...). Dans ce premier chapitre est présenté l'état d'avancement de la transition numérgétique du bâtiment : objectifs de la TEPCV, situation de déploiement du BIM et outils d'évaluation, processus de rénovation, changements organisations dus à la transition numérique dans l'activité de gestion de patrimoine immobilier.

1. Transition énergétique : pour une Croissance Verte

1.1. Trajectoire énergétique française

L'aspiration française à une Croissance Verte se traduit par la mise en application de réglementations successives : les lois Grenelle I de juin 2009 et Grenelle II de juillet 2010 tout d'abord, puis plus récemment la Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (TEPCV) en vigueur depuis 2015.

Les ambitions de la loi TEPCV sont importantes, notamment dans le domaine du bâtiment, qu'il s'agisse d'économies d'énergie ou de mobilisation des énergies renouvelables. Pour autant, le taux annuel de renouvellement du parc, de l'ordre de 1% à 1,5% seulement, révèle qu'une grande part du parc de bâtiments à considérer à l'horizon 2050 est aujourd'hui déjà construite. La construction de bâtiments neufs sur le modèle des Bâtiments Basse Consommation (BBC), Haute Performance Énergétique (HPE) ou à énergie positive (BEPOS) ne représenterait donc pas un potentiel suffisant pour atteindre les objectifs nationaux de performance fixés par le Grenelle de l'Environnement. Car en effet, le parc existant représente l'essentiel du gisement d'économies en raison :

- De l'absence, avant 1974, de réglementation thermique ;
- Des étapes réglementaires nécessairement longues à se mettre en place (état des connaissances, disponibilité des techniques, développement des compétences, appropriation des enjeux) : 1982, 1989, 2000, 2005, 2012, bientôt peut-être 2020 ;
- Des bâtiments parfois voire souvent dégradés : défaut d'entretien du fait de processus de maintenance/rénovation lourds et coûteux, méconnaissance de l'état réel des bâtiments, obsolescence naturelle, technique ou encore réglementaire ;
- Des usagers la plupart du temps peu au fait des enjeux et des conséquences d'une consommation énergétique non maîtrisée...

Autant dire que le patrimoine bâti existant recèle en effet d'importants gisements d'économie d'énergie et donc de réels leviers d'action. Ceux-ci peuvent tous être adressés par la rénovation du parc à travers la mise en œuvre de politiques énergétiques engagées. C'est donc bel et bien sur le patrimoine existant que les actions doivent être concentrées pour avoir une incidence significative. L'acte de rénover semble aujourd'hui le seul compromis acceptable entre réduction des impacts environnementaux et développement durable des dynamiques territoriales et sociales.

1.2. Enjeux et objectifs de la rénovation

Les objectifs de rénovation sont imposés par la Réglementation Thermique des Bâtiments existants, laquelle stipule qu'*« Avant 2025, tous les bâtiments privés résidentiels dont la consommation en énergie primaire est supérieure à 330 kilowattheures d'énergie primaire par mètre carré et par an doivent avoir fait l'objet d'une rénovation énergétique. »* Les performances après rénovation sont appréciées à l'aide d'indicateurs physiques (Bbio et Cep). Il existe également des Labels (HPE rénovation, BBC rénovation etc.), mais leur atteinte n'est pas un objectif réglementaire.

Dans le cycle de vie d'un bâtiment, c'est l'étude préliminaire qui dicte l'acte de rénover ou non, et si oui par quels biais techniques (Thorel, 2014). En cela, la rénovation au cas par cas répond bien aux spécificités d'un ouvrage, mais pas aux objectifs de massification des opérations de rénovation entreprises. Des approches innovantes de type EnergieSprong pourraient permettre des flux plus importants (à l'instar de la préfabrication sur les sites de construction). Quoiqu'il en soit, raisonner au cas par cas n'est pas toujours possible, ni souhaitable. Chaque bâtiment fait partie d'un ensemble plus

vaste (parc, quartier, ville, territoire) qu'il convient de prendre en compte pour une amélioration durable de nos espaces bâtis.

Par ailleurs ces espaces, le quartier, la ville, le territoire, sont autant de périmètres susceptibles de proposer et d'intégrer une politique d'adéquation durable entre énergies, construction, technologies et urbanisation. Et selon Bruno Peuportier, chercheur Mines ParisTech, lors de son intervention à SIMUREX 2015¹, l'analyse de cycle de vie s'opère tout aussi bien à l'échelle du quartier, et donc par extension, de la ville ou du territoire, qu'à l'échelle du bâtiment. Aussi le gouvernement français renforce-t-il ses engagements dans Grenelle et TEPCV par la mise en place de programmes connexes en aménagement du territoire, comme le (N)PNRU (parmi d'autres) qui préconise la rénovation du parc bâti français, avec un objectif de 500 000 logements rénovés annuellement d'ici 2020.

Le terme de « rénovation urbaine » désigne la reconstruction de la ville sur elle-même et le recyclage de ses ressources bâties et foncières. Elle regroupe plusieurs familles d'opérations visant à revaloriser et à diversifier le cœur du patrimoine bâti (déconstruction, démolition/reconstruction, réhabilitation/restauration, requalification, restructuration...). La bonne articulation de ces différents types d'opération est garante du succès d'un projet de rénovation urbaine et du plan d'aménagement du territoire dans lequel elle s'inscrit.

En effet, au-delà de la seule considération des bâtiments, de leur enveloppe et leurs systèmes, la rénovation peut concerner un éventail d'objets techniques bien plus large incluant également les réseaux (d'eau, de chaleur, de traitement des déchets), l'accessibilité aux services de proximité (éducation, santé, transports, commerces), et adresser des verrous économiques et sociaux (emplois, bassins de vie, ruralités, mixité sociale, migrations...). Parce qu'elles visent ce type d'action globale, pluridisciplinaire et transcalaire, les opérations de rénovation urbaine prennent de l'ampleur en particulier dans les métropoles où la densité de population s'accroît durablement, faisant de la transformation des espaces un sujet inévitable.

1.3. Complexité de la rénovation urbaine

Il n'en reste pas moins que le métabolisme propre des espaces urbains (quartier, ville, territoire) repose sur la conjonction de multiples aspects. Santé, éducation, environnement, société, cadres juridiques existants et enjeux économiques associés sont autant de considérations qu'il convient d'intégrer pleinement dans l'étude des projets de rénovation urbaine.

En conséquence, le parc urbain est géré par une multitude d'acteurs, dont les intérêts et les objectifs doivent être conciliés. Le facteur énergie n'est alors qu'une composante parmi les forces qui en sous-tendent le fonctionnement, et les relations entre territoires et énergie ne peuvent s'exprimer qu'à travers un certain nombre d'éléments médiateurs (activités, besoins, échanges, mobilités de toutes natures, attitudes, préférences, comportements) (Tabourdeau and Debizet, 2017). Parallèlement ces réseaux d'acteurs s'étoffent progressivement à travers l'émergence de nouvelles formes urbaines et de spécialités professionnelles (éco-construction, éco-quartiers etc.). De plus le millefeuille institutionnel généré par un morcellement extrême des territoires (typiquement français, c'est moins le cas dans les autres pays européens) crée, à toutes les échelles, des ruptures hiérarchiques et des divergences d'intérêts. Les jeux d'acteurs impliqués par de telles strates fonctionnelles, aboutissant à des luttes de pouvoir très complexes, ne favorisent pas l'émergence de stratégies réellement efficaces dans la prise en compte des questions énergétique et environnementale (Epstein, 2012; Idt, 2009; Subra, 2008).

De nouvelles normes et mesures d'incitation voient constamment le jour dans le secteur de la construction et dans les administrations publiques dans le but d'intensifier tant en termes de nombre que de résultat les opérations de rénovation entreprises pour la rénovation urbaine. Cette quête de performance du patrimoine bâti se heurte toutefois au niveau d'information des décideurs, à leur motivation et leur réelle capacité d'action lesquels, couplés à des politiques mouvantes, rendent le processus de transition énergétique et environnementale particulièrement lent et difficile. Ainsi les rapports de la Cour des Comptes² et du CESE³ publiés en février 2018 font-ils mention de la non-

¹ École d'été sur le thème de la SIMUlation et Retour d'Expérience, <http://simurex.ibpsa.fr/>.

² <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2018-04/20180404-rapport-programme-habiter-mieux.pdf>.

³ https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2018/2018_04_loi_transition_energetique.pdf.

atteinte de l'objectif de 500 000 rénovations annuelles assigné en 2013 par le gouvernement dans le cadre du Grenelle de l'Environnement. Rythme et qualité des rénovations, confiance fragile dans les audits et les artisans... en dépit de budgets conséquents alloués à la TEPCV (34,2⁴ milliards d'euros en 2019), l'effet levier des incitations reste limité et la rentabilité des investissements est sujette à caution.

Aujourd'hui de nouvelles opportunités s'offrent aux acteurs du Génie Civil, de l'Architecture et de l'Urbanisme pour la réalisation de projets dits « intégrés » dont beaucoup reposent sur la transition numérique du parc construit. Ainsi, pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments et assurer leur conformité aux exigences environnementales, nombre d'acteurs considèrent qu'il est essentiel de maîtriser l'analyse et l'utilisation de l'information technique du parc immobilier. À l'ère de la concertation et de l'intelligence collective, nécessaires prérequis de la durabilité, les données de construction et d'exploitation représenteraient alors une véritable valeur ajoutée pour déterminer et atteindre les objectifs d'urbanisme, planifier les actions à mettre en œuvre et évaluer les moyens nécessaires, mesurer leur efficacité, mettre en évidence les écarts et définir des actions correctives le cas échéant. Si l'on peut arguer que la rénovation ne fait pas véritablement rupture avec les processus traditionnels de construction, ce n'est à l'évidence pas le cas du BIM et plus globalement des technologies numériques qui vont transformer en profondeur les modes d'action, les relations entre acteurs ou encore les métiers.

2. Transition numérique : la course à l'*e*-space

2.1. BIM : l'acronyme aux trois visages

La France n'impose pas (encore) le BIM dans les opérations du secteur de la construction-rénovation. Néanmoins, début 2015 est mis en place, dans le cadre du plan de relance de la construction, le Plan de Transition Numérique du Bâtiment (PTNB). Quatre préconisations sont identifiées dans la feuille de route du PTNB⁵ :

- convaincre les acteurs ;
- répondre aux besoins (équipement, compétences) des acteurs ;
- développer des outils adaptés à tous les projets ;
- créer les conditions de la confiance dans l'écosystème numérique.

Quatre ans plus tard, le Plan BIM 2022 lui succède, avec comme objectif de généraliser l'utilisation du numérique dans le bâtiment d'ici 2022. Ces deux plans définissent donc les grandes trajectoires numériques nationales de la construction avec pour ambition de répondre à un besoin de qualité et de performance, de traçabilité et d'efficacité dans la gestion des projets.

Le BIM réfère à la centralisation des données de construction sous la forme d'une maquette numérique multi-échelles. Les informations sur les processus de conception, de construction, de rénovation et de gestion sont partagées et centralisées via BIM, donc consultées et / ou modifiées par tous les acteurs impliqués dans le projet de construction. Par extension, le BIM devient le processus même de conception et de gestion du bâtiment en s'appuyant sur le modèle numérique. Bien qu'il n'ait pas encore atteint son plein potentiel de maturité technique, le BIM se distingue des nouvelles technologies émergentes dans le secteur de la construction par un impact très prévisible sur la gestion et la conformité des bâtiments. Offrant une maîtrise standardisée et collaborative des données de construction, il est considéré dans la littérature comme un support de décision privilégié pour atteindre la pertinence et la pérennité de tout projet (Celnik et al., 2015).

(Barlsh and Sullivan, 2012) dressent un état de l'art fourni des différentes notions que recouvre le BIM et des moyens d'en mesurer les bénéfices. Le BIM a en effet la particularité de contenir trois définitions dans un seul acronyme, signifiant à la fois BIM Model, BIM Modeling et BIM Management. Les trois concepts permettent comprendre les enjeux de l'adoption du BIM comme vecteur de transition du parc bâti pour ses détenteurs ou gestionnaires.

⁴ <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/1-milliard-deuros-supplementaires-pour-la-transition-ecologique-58545/>

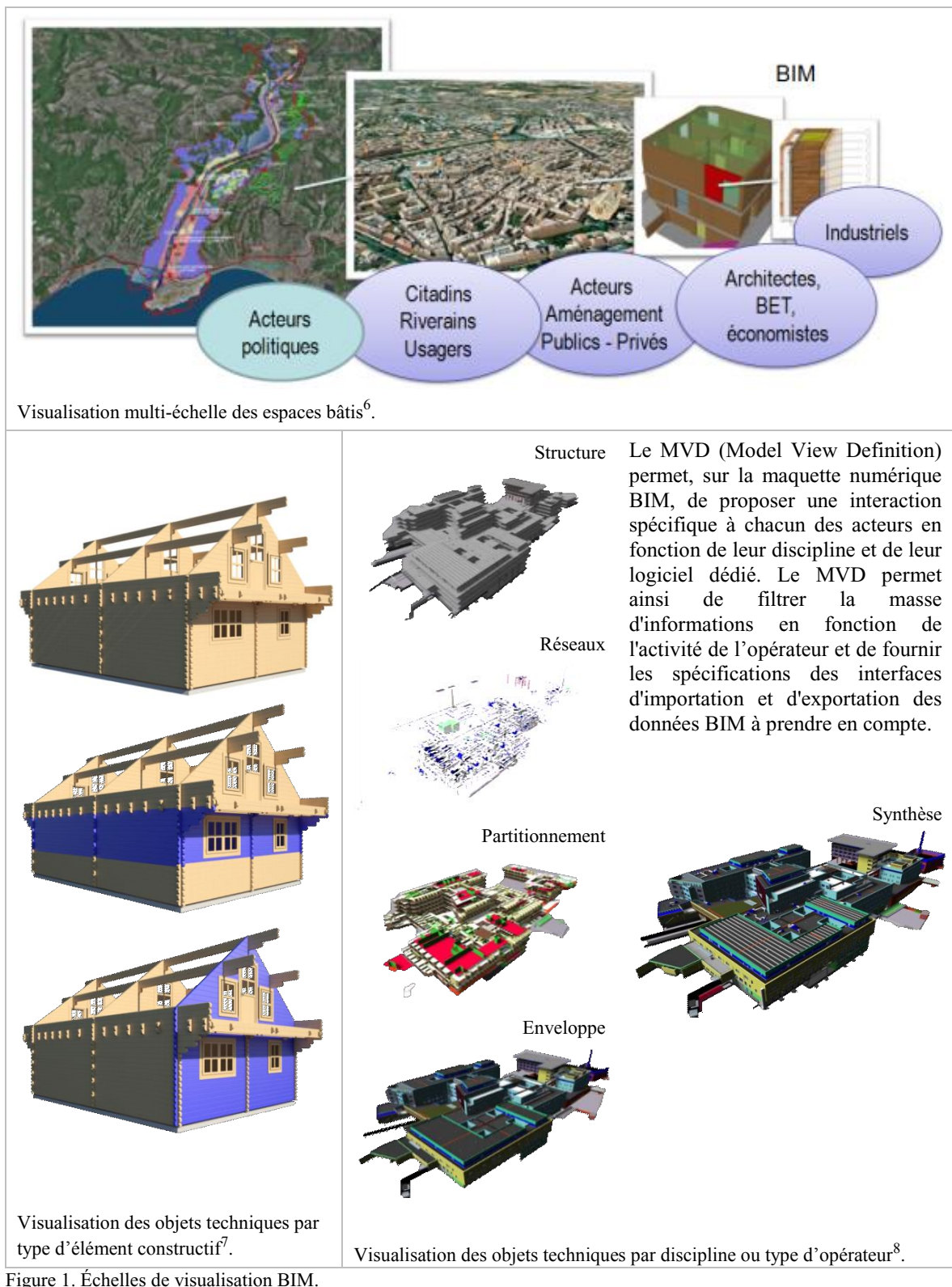
⁵ Disponible à l'adresse suivante : <http://www.batiment-numerique.fr/uploads/PDF/PTNB%20-%20Feuille%20de%20route%20operationnelle.pdf>

2.1.1. BIM Model

On parle ici du contenu : les données géométriques et constructives qui composent l'objet numérique BIM. Ce qu'on appelle BIM Model est donc (ou devrait être) le jumeau numérique de l'objet technique réel à représenter.

Le BIM a été initialement pensé pour l'échelle bâtiment, et c'est la raison pour laquelle il porte ce nom. Après avoir fait ses preuves en se montrant opérationnel à cette échelle, l'outil s'est déployé, verticalement et horizontalement. On y a progressivement intégré de plus en plus de propriétés, liées à des disciplines variées (développement durable, gestion d'exploitation...), et traité de plus grandes échelles. Son nom aurait dû évoluer par la même occasion, (citons quelques tentatives : MNU, Maquette Numérique Urbaine ; CIM, City Information Modeling...). L'appellation communément retenue et utilisée reste celle de BIM, explicite. Jusqu'à finalement faire valoir une méthode plus qu'un outil à proprement parler à travers le terme. Sa définition s'est étoffée, et son spectre s'est élargi aux « processus numériques » dans la construction et l'aménagement multi-échelles.

Une des fonctions majeures du BIM est la visualisation des données sous forme d'une maquette (jumeau) numérique (cf. *infra*). La donnée graphique a donc toute son importance : elle permet la représentation géométrique des espaces (surface, zones, volumétrie...) et leur visualisation en trois dimensions, ce qui facilite la compréhension (aspect cognitif) du projet. Ces données graphiques permettent de décrire les composants du bâtiment sous forme d'« objets » numériques, auxquels sont appliquées des « règles » de comportement qui définissent la manière dont les objets sont liés entre eux (relations topologiques). La visualisation nD est la caractéristique la plus connue du BIM, et aussi la pratique la plus répandue. En effet, la visualisation d'une maquette numérique ne requiert pas de compétences en modélisation à proprement parler. Elle est en fait indépendante du processus de création de donnée : elle en est le résultat. La fonctionnalité est normalement comprise dans les outils de modélisation. De plus, des viewers (qui permettent, donc, uniquement de consulter la maquette, pas de la modifier) sont également disponibles et gratuitement (c'est le cas d'eveBIM, viewer développé au CSTB). La Figure 1 en page suivante présente quelques exemples d'échelles typiques de visualisation d'un objet BIM.



⁶ Source : <http://www.unit.eu/cours/bim/>

⁷ Source : <http://www.aga-cad.com/blog/from-bim-to-building-how-to-get-maximum-utility-from-the-bim-model>

⁸ Source : Images du projet BIM de l'Hôpital d'Ajaccio, CSTB

Ces objets numériques sont qualifiés de paramétriques, car en plus d'être décrits géométriquement, ils sont également renseignés de données non-graphiques, c'est-à-dire qu'ils intègrent des informations associées aux caractéristiques techniques des composants, qui ne sont pas explicites dans leur géométrie. Ces informations non-graphiques sont appelées attributs. L'intérêt d'une telle architecture de données est qu'elle permet de rassembler un nombre croissant d'informations autour d'un ouvrage, ce dans le but de fournir une base de données coordonnée et cohérente, utile à une gestion durablement maîtrisée du bâtiment réel.

Au-delà de la centralisation des données telle que décrite ci-dessus, le BIM Model a surtout vocation à faciliter le traitement et l'échange des données entre les acteurs d'un projet. Ceux-ci en effet disposent d'outils spécifiques à leur corps de métier, et traitent des formats de données différents, pas toujours compatibles. C'est un autre intérêt du BIM ; on parle alors d'interopérabilité, c'est-à-dire de la faculté de la maquette (ou de tout autre logiciel) à échanger « librement » (sans restrictions ni pertes) des données avec d'autres solutions numériques (logiciels de simulation, catalogues et bibliothèques d'objets).

De même, plus l'environnement logiciel est hétérogène dans un processus traditionnel, plus l'échange et le partage de données sont rendus inefficaces (exports et imports impossibles, pertes de donnée ou de précision sur la donnée). Le BIM s'affranchit de l'hétérogénéité des formats, mais requiert l'homogénéisation de l'architecture de données. Et c'est aussi pourquoi la structuration des données doit être réalisée de préférence dans un format ouvert, standard, pour ne pas retomber dans les défauts d'interopérabilité.

Le LOD (Level of Detail) est le niveau de détail des données graphiques : il mesure essentiellement la quantité de détails graphiques inclus dans l'élément modélisé.

Le LOI (Level of Information) est le niveau d'information des données non-graphiques. Il concerne les données techniques, les éléments de planning ou le référencement des éléments constructifs qui correspondent aux « attributs » associés à un élément du BIM.

Le LODt (Level of Development) est le niveau de développement du jumeau numérique. Le LODt est fonction des caractéristiques géométriques (LOD) du modèle BIM et de la quantité d'informations qu'il contient (LOI).

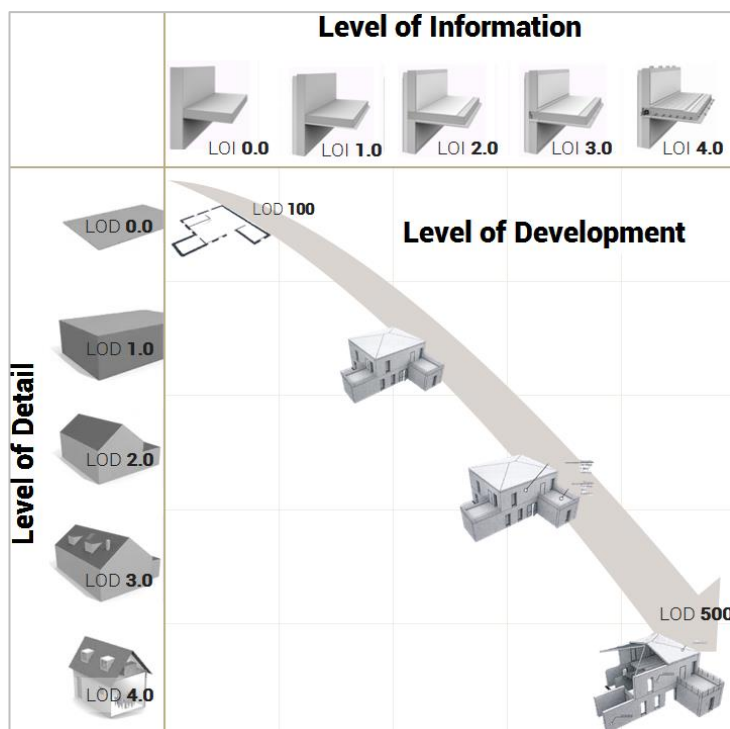


Figure 2. Level Of Detail, Level Of Information, Level Of Development. Illustration adaptée de (Celnik et al., 2015).

L'American Institute of Architects (AIA) cité par (De Maestri, 2017) suggère dans *AIA Document G202-2013* une définition générique du contenu informationnel des modèles selon cinq LODt de base, présentés en Table 1.

De plus en plus, ces LODt sont rapprochés des différentes phases d'un projet : voir l'interprétation du PAS 1192-2 par (De Maestri, 2017) en Table 2 ci-après.

Table 1. Contenus de données des LODt. Tiré de (De Maestri, 2017) et (Celnik et al., 2015).

LODt	Contenus informationnels attendus des LODt selon AIA Document G202-2013
LOD 100	Essentiellement l'équivalent de la conception, le modèle consisterait en la masse globale du bâtiment et les utilisateurs en aval seraient autorisés à effectuer des analyses complètes (volume, orientation du bâtiment, coût par pied carré, etc.)
LOD 200	Similaire à la conception schématique, le modèle consisterait en « systèmes ou assemblages généralisés avec des quantités approximatives, taille, forme, emplacement et orientation ». Les utilisations autorisées incluraient « l'analyse des systèmes sélectionnés par application de critères de performance généralisés ».
LOD 300	Les éléments de modèle conviennent à la production de documents de construction traditionnels et de dessins d'atelier. À ce titre, l'analyse et la simulation sont autorisées pour les éléments et les systèmes détaillés.
LOD 400	Ce niveau de développement est considéré comme approprié pour la fabrication et l'assemblage. L'auteur de l'élément modèle (MEA) de cette LD est le plus susceptible d'être l'entrepreneur ou le fabricant.
LOD 500	Le dernier niveau de développement représente le projet tel qu'il a été construit. Le modèle est adapté à la maintenance et aux opérations de l'installation.

Table 2. Phases de projet associées aux LODt selon PAS 1192-2. Tiré de (De Maestri, 2017).

	LODt	Phase MOP associée (FR)	Contenus graphiques attendus	Contenus informationnels attendus
Classification des LODt selon le PAS 1192-2 (UK)	LODt 1	Dossier initial	Maquette ou ensemble graphique des informations existantes	
	LODt 2	Concours	Diagrammes, volumétries, symboles 2D, représentation d'éléments génériques	Nomenclature générale
	LODt 3	APS, APD	Définition des objets	Renseignements basiques permettant la sélection des produits et leur identification
	LODt 4	PRO, DCE	Représentation 3D des objets détaillée selon les spécificités du cahier des charges (la maquette rendue aux entreprises pour répondre à l'appel d'offre correspond au CCTP)	Ajout de renseignements spécifiques sur l'allocation des espaces, fonctionnement, accès et entretien (informations génériques)
	LODt 5	Exécution	Les objets génériques sont remplacés à fur et mesure de l'évolution de la phase par les objets fabricants	Les informations génériques sont remplacées par les informations fabricants
	LODt 6	DOE	La modélisation correspond géométriquement au « tel que construit »	Toutes les informations nécessaires sont incluses dans les documents d'export, y compris la maintenance, les dossiers de mise en service, la santé et les exigences de sécurité, et ainsi de suite
	LODt 7	Maintenance et gestion	Aucun ajout au niveau graphique	Exploitation des données de la maquette et leur réorganisation et mise à jour si nécessaire

Toutefois, il n'existe pas aujourd'hui de définition normalisée pour la France, et ce sujet est par ailleurs en pleine évolution dans de nombreux pays.

2.1.2. BIM Modeling

C'est l'acte de générer le contenu, le processus de création de la donnée. Nous l'avons vu précédemment, le BIM est un réceptacle qui permet d'organiser et de restituer la donnée, mais il a surtout vocation à communiquer avec son environnement logiciel, c'est-à-dire l'ensemble des logiciels dédiés aux activités et fonctions spécifiques des différents corps de métiers parties prenantes d'un projet. C'est par ce processus de création de données en interne, puis d'export vers la maquette dans un format accessible (en termes de lecture, de compréhension etc.), qu'aboutit la création d'informations valorisables. Les éditeurs de logiciels développent en parallèle des versions « BIM-compatibles » de plus en plus élaborées et « fiables ». Ainsi ces produits ont-ils connu ces dernières

années un déploiement considérable en nombre et en diversité. En Figure 3 est présenté un rapide benchmark des principaux outils de modélisation métier qui constituent l'environnement BIM actuel⁹.

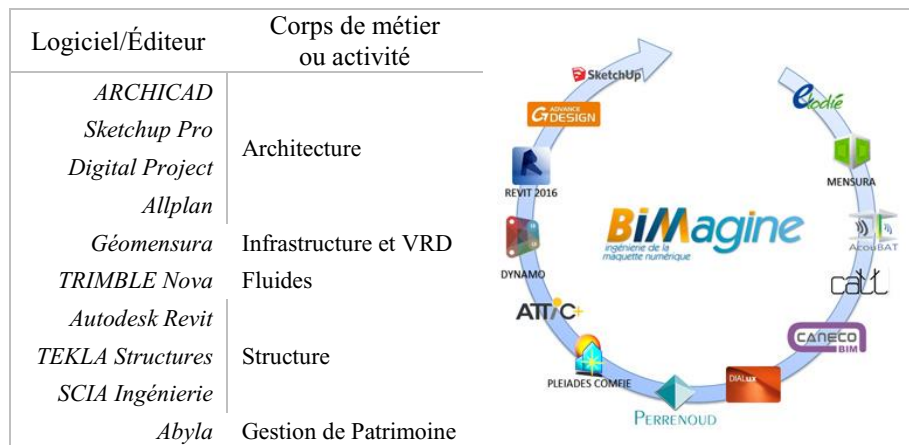


Figure 3. Cartographie du parc logiciel composant l'environnement BIM.

La grande majorité de ces outils dédiés à la création de données « BIM-compatibles » sont des outils commerciaux, très souvent onéreux. De plus, certains fonctionnent selon un modèle économique d'abonnement annuel. Si ces logiciels font déjà partie de l'écosystème des outils utilisés par un acteur, cet investissement est acceptable car la compétence interne existe. En revanche, ceux qui envisagent d'adopter le BIM mais ne disposent pas de solutions compatibles devront considérer l'investissement financier du logiciel en question, des coûts de formation à ces logiciels et de formation BIM, en plus d'une période d'apprentissage que d'autres résorberont plus facilement... En cela, le BIM reste encore étranger à la grande majorité d'un secteur fortement atomisé, c'est-à-dire pour l'essentiel des PME et TPE¹⁰.

Il s'agit en effet de monter en compétence au niveau de la connaissance du processus de conception, construction et gestion d'un ouvrage, et gestion d'équipes, mais également d'être bien informé des évolutions technologiques afin de les combiner savamment pour qu'elles soient au service du projet.

L'analyse des maquettes BIM est également un sujet de développement permanent, conduisant selon (De Maestri, 2017) à « la mise à disposition d'outils qui permettent à la fois :

- l'assemblage des maquettes métier
- l'analyse des modélisations
 - géométrique (visuellement par prise de cotations) ;
 - qualitative (par analyse des données),
- l'analyse des quantitatifs et les simulations 4D (liaison de la maquette avec le planning du projet). »

2.1.3. BIM Management

C'est la gestion du contenu, par laquelle il s'agit d'orchestrer l'accès aux données des différentes parties prenantes (écriture, enrichissement, conseil) et de gérer les processus d'utilisation de la base de données BIM. C'est donc la clé de la conformité du BIM Model. Cette notion de BIM management est une évolution notable du fonctionnement des acteurs d'une opération, du mode séquentiel d'échange et d'interaction vers un mode intégré dans lequel les acteurs d'un même projet peuvent accéder en même temps aux différentes sources d'informations utiles à la réalisation du projet.

L'adoption du BIM, son intégration technique et sa diffusion dans les processus de travail internes impliquent d'après (De Maestri, 2017) « la mise en place d'une méthodologie de travail propre à chaque entreprise, avant que celle-ci puisse être systématisée à chaque projet. Le BIM interne, qui permet à une entreprise de développer son socle et ses méthodologies de travail BIM, sa compétitivité en la matière, se différencie du BIM externe, qui relève de la gestion de projet, du partage de données avec les autres intervenants, de la mise en commun des informations et de la recherche de compromis

⁹ Sources media.xpair.com et <http://www.bim-partners.fr/index.php/le-bim/la-maquette-numerique>.

¹⁰ PME Petites et Moyennes Entreprises ; TPE Très Petites Entreprises.

entre les méthodologies des différents intervenants. » La norme anglaise BSI PAS 1192-2 :2013 devenue référence mondiale définit les niveaux de maturité BIM (voir Figure 4 ci-dessous) qui permettent de définir le niveau d'intégration numérique d'un projet grâce aux modèles BIM.

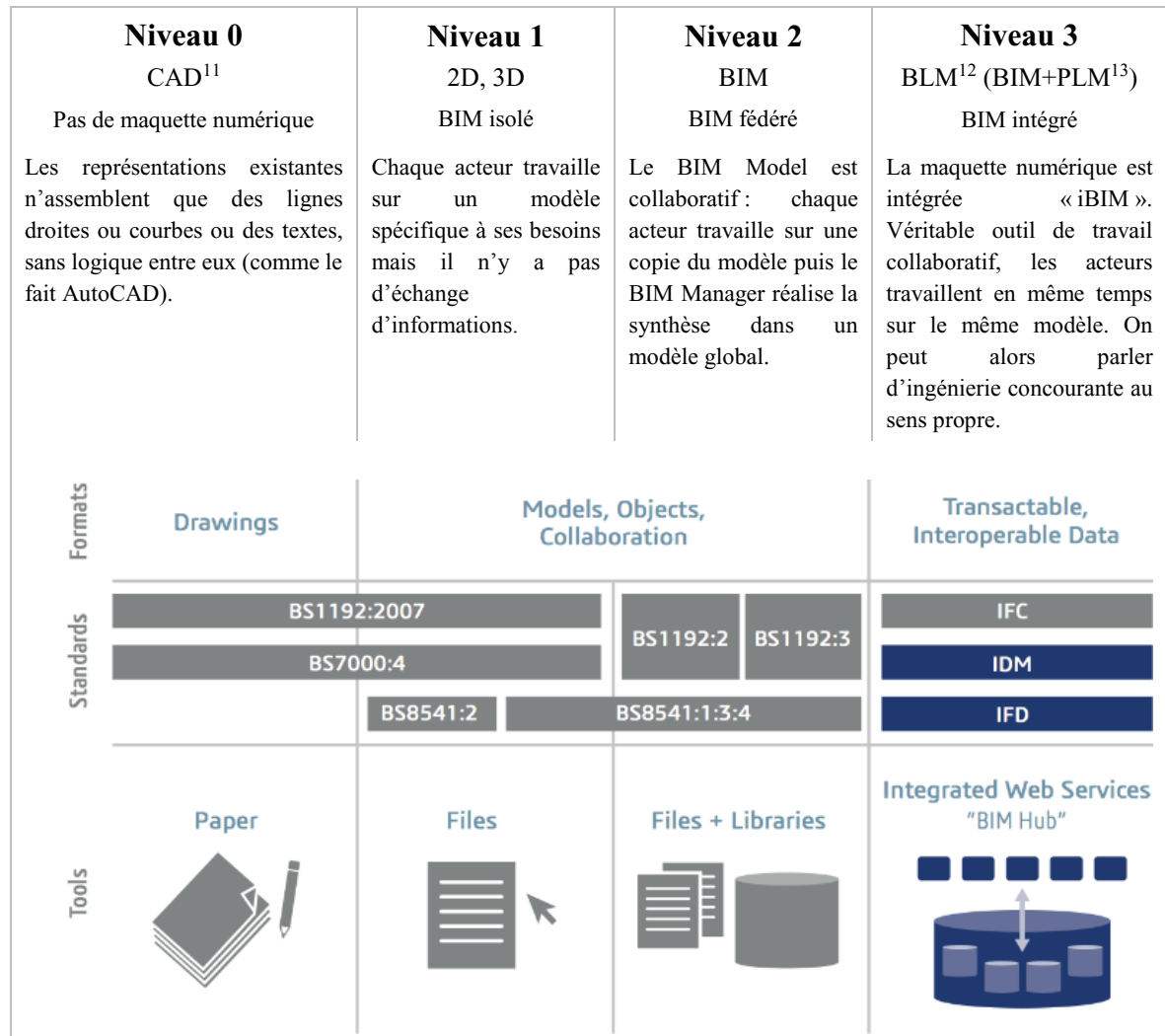


Figure 4. Modèle de maturité BIM de Mark Bew et Mervyn Richards, tiré de (Celnik et al., 2015).

Lorsque l'intégration du BIM atteint son niveau le plus élevé (maturité de niveau 3 sur l'échelle de Mark Bew et Mervyn Richards), toutes les parties prenantes ont accès aux mêmes informations numériques via un serveur d'échange (où la base de données BIM est stockée) et chacune peut utiliser des outils spécifiques au secteur, à condition qu'ils soient compatibles avec le format partagé de la base de données BIM.

Cependant, un tel niveau de maturité exige nécessairement une grande quantité de connaissances, ce qui donne lieu à des besoins d'information considérables en termes de volume et de fréquence dans tous les domaines de l'expertise du projet. Ce problème de traitement de l'information de masse, en plus des fortes contraintes de données constructives sur les bâtiments existants indisponibles ou incertains, remet en question la performance globale des technologies BIM (AGI 2015). De plus, la création de flux d'information coordonnés et un contrôle efficace de la gestion BIM entraînent d'autres défis internes et externes émergents, principalement liés au financement, au recrutement de nouveaux talents, à la formation de la main-d'œuvre et à la capitalisation des connaissances reproductibles.

Un des aspects du BIM Management concerne également, dans cette continuité, l'appréhension du déplacement, en termes de volumes et de temporalité, des efforts à produire pour la réalisation d'une

¹¹ Computer-Aided Design, équivalent CAO Conception Assistée par Ordinateur.

¹² Building Lifecycle Management, équivalent ACV Analyse du Cycle de Vie du bâtiment.

¹³ Product Lifecycle Management, équivalent ACV Analyse du Cycle de Vie d'un produit.

opération de construction. Ce phénomène est illustré par la célèbre courbe de Patrick Mac Leamy, présentée en Figure 5 ci-après. Selon sa théorie, l'information technique rendue disponible et collaborative à l'adoption du BIM permettrait, par la seule modification des flux de travail conventionnels, de réduire le coût global des opérations.

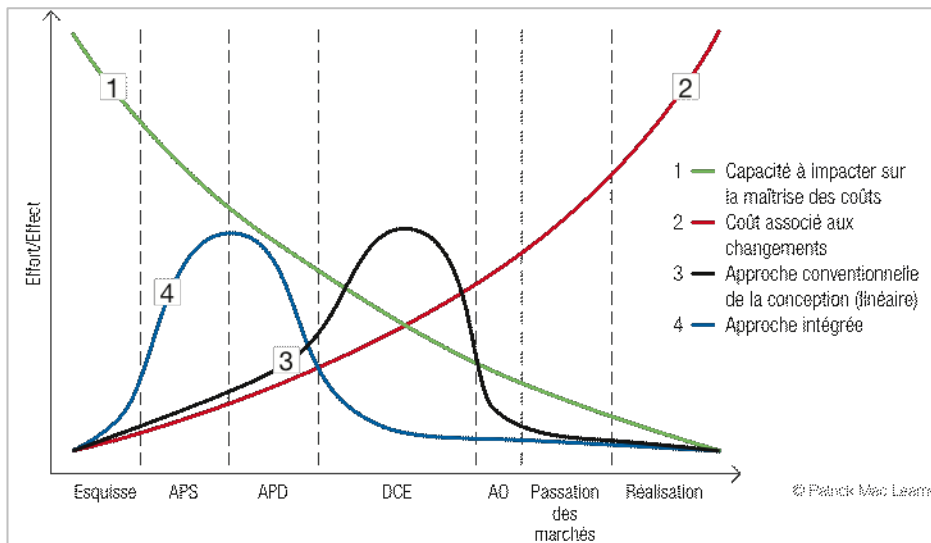


Figure 5. Courbe Mac Leamy : impact du BIM sur les coûts de conception-réalisation d'un projet de construction.

2.2. Complexité des évolutions technologiques

Le BIM tend à devenir une pratique standardisée destinée à faire face aux transitions énergétique et numérique dans le secteur de l'ingénierie et de la construction. Le BIM, malgré l'engouement qu'il génère, soulève toujours un grand nombre de questionnements relatifs tant aux flux de données qu'il demande qu'aux jeux d'acteurs qu'il implique. En cela, les freins et leviers liés à l'intégration de la maquette numérique dans les projets de construction sont encore mal connus, ce plus particulièrement s'agissant d'opérations de rénovation à l'échelle du stock de bâtiments.

Ces recherches montrent que les multiples évolutions technologiques que vit le secteur du BTP sont source d'une complexité croissante, résultat tout à la fois d'un développement des interrelations existantes ou attendues entre acteurs et d'une inflation des données nécessaires ou requises. Fortement atomisé (99 % des entreprises sont selon la Fédération Française du Bâtiment des TPE et PME de moins de 50 personnes, structures qui accueillent plus de 72 % des salariés du secteur¹⁴), le secteur est constitué d'entités dont les capacités financières, matérielles et humaines sont très limitées et peu en adéquation avec ces évolutions technologiques constitutives d'une transition à la fois technique, managériale et organisationnelle.

Or, le BIM demande un engagement fort : standardisation et structuration des données, formats propriétaires, versioning, mise à jour et maintien des compétences, etc. La mise en œuvre effective des technologies numériques reste donc en deçà des ambitions notables des acteurs notamment publics. Si dans plusieurs pays l'organisation professionnelle (en particulier la préexistence de la « cellule projet ») a donné tout son sens au BIM (tout d'abord comme outil puis comme processus et méthode de travail), la situation française provoque des résistances : cloisonnement des métiers, hiérarchie des institutions, morcellement administratif des territoires...

¹⁴ Voir *Le Bâtiment en chiffres 2018* (FFB, 2019).

3. Transition numergétique : une question épistémologique

Le changement climatique implique de reconsidérer notre modèle de croissance, jusqu'alors orienté par la recherche du « toujours plus » qui ne se soucie guère de la disparition des ressources nécessaires à son obtention. Aussi les transitions futures en matière de durabilité ne ressembleront probablement pas aux transitions passées selon (Papachristos, 2019) et même elles doivent s'orienter vers la voie fondamentalement différente des faibles émissions de carbone, de la croissance économique limitée, et de la consommation réduite de ressources (Unruh, 2002 ; van den Bergh, 2011).

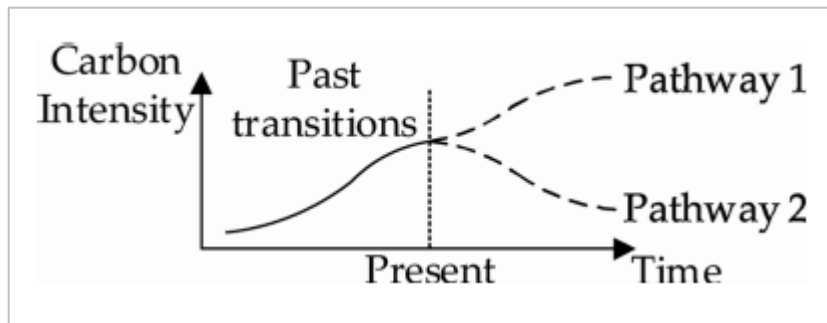


Figure 6. Chemins de transition historique et contemporains selon (Papachristos, 2019).

La question des transitions est donc centrale dans le traitement de la question numergétique, intégrant nécessairement les temporalités longues, qui régissent d'une part les projets de construction et d'urbanisme et d'autre part « l'inertie » du secteur BTP au changement, dans le développement de leurs innovations. Les implications socio-techniques de la transition numérique modifient en profondeur les dynamiques de marché comme les échanges locaux, et ses impacts concernent un vaste panel d'échelles et d'acteurs.

Le MOOC « Éthique de la recherche » précise dans sa séquence consacrée au numérique¹⁵ que « *Le numérique désigne à la fois un champ de recherche, dont les inventions renouvellent profondément les disciplines scientifiques (avec les Big Data, par exemple) mais aussi les pratiques sociales et individuelles, et une modalité transversale puisque tous utilisent aujourd'hui l'informatique aussi bien pour collecter leurs données, les traiter, les partager ou les stocker. Objet et condition de la recherche, le numérique pose des questions nouvelles à plusieurs égards.* » Il y est démontré que les développements scientifiques soulèvent des questions globales hors des spécificités disciplinaires : « *Toute innovation scientifique suscite des questions éthiques nouvelles encore impensées qui demandent de prendre au sérieux la nouveauté des problèmes. L'accélération et l'intensification des innovations, mais aussi l'augmentation des puissances technologiques associées constituent déjà par elle-même une question éthique : si nous savons faire de nouvelles choses, nous ne savons souvent pas ce que feront ces choses sur notre environnement, notre santé, notre économie, notre société.* ».

La séquence souligne notre difficulté collective face au concept de bien commun : « *La controverse sociotechnique ne résulte pas de peurs irrationnelles ou de complots, mais exprime la difficulté à nous mettre d'accord sur un bien commun. Il s'avère par conséquent essentiel de prêter attention aux interrogations des citoyens en matière de choix technoscientifiques.* » Le BIM et le numérique de façon générale donnent lieu à une surenchère d'innovations, avec comme conséquence une accélération des rythmes de révision des processus. L'inertie réputée du secteur de la construction soulève donc la question épineuse de l'assimilation de ces transformations. « *Comment garantir à la recherche le statut de bien commun à une époque de haute concurrence à un niveau global, avec des conditions et des intérêts financiers très contraignants, avec des impacts sur le long terme aussi bien en termes environnementaux, sanitaires que sociaux ? Les choix politiques et juridiques de gouvernance des organisations publiques reposent ici sur une hiérarchie de valeurs spécifiques.* ».

Les transitions sociotechniques sont intrinsèquement polycentriques, multi-agents, pluridisciplinaires et pluridimensionnelles en termes de temps et d'espace, car soumises à des échelles variables dans les deux cas (Geels and Schot, 2007; Köhler et al., 2018; Papachristos, 2018). Pour ces raisons, l'approche systémique, parfois appelée approche intégrée, est aujourd'hui largement favorisée dans les

¹⁵ https://www.fun-mooc.fr/asset-v1:universite-lyon+91001+session02+type@asset+block/MOOCER_M2S3a_Doueih.pdf

modèles prospectifs de transition énergétique selon (Li et al., 2015). Il existe selon eux un nombre important de méthodes, et celles-ci s'orientent de plus en plus vers l'évaluation de la durabilité et de la performance environnementale. (Elsawah et al., 2017) révèlent par ailleurs la capacité unique de l'approche systémique à prendre en charge un dialogue de fond sur un problème commun, au-delà des parties prenantes, en permettant d'identifier les impacts potentiels d'options alternatives de gestion et d'évaluer leurs avantages et coûts sociaux, économiques et environnementaux associés. En cela la modélisation systémique possède selon eux une forte aptitude à contribuer utilement à l'élaboration des politiques socio-environnementales.

4. Réconcilier transition numergétique et sciences de bien commun

La transition énergétique est essentiellement imposée par la législation. Souhaitable d'un point de vue environnemental et dans l'intérêt général sans être forcément souhaitée ou comprise par ceux qui en sont les porteurs, il s'agit d'une transition longue (diluée dans la durée), progressive et lente (pente faible du chemin de transition énergétique). La transition numérique, fortement soutenue par les dynamiques de marché et largement souhaitée par les instances, suit un rythme bien plus appuyé en dépit de l'absence de support réglementaire et apparaît comme une mutation radicale qui englobe à la fois « *les pratiques sociales et individuelles, les champs de recherche et les modalités transversales* ».

BIM et rénovation sollicitent des investissements lourds et un fort engagement des porteurs des mutations, auxquels s'opposent d'une part la disponibilité limitée de ressources financières, humaines et informationnelles au sein des organisations, d'autre part l'inertie réputée du secteur de la construction au changement. Si le BIM fédère autour des concepts collaboratifs qui le caractérisent, les retours d'expérience d'implémentations réelles manquent encore d'épaisseur et questionnent les leviers de performance et de réussite de l'adoption du BIM. Ainsi révélée, notre inintelligence (voire méconnaissance) de certains facteurs de transition exprime le manque actuel d'un argumentaire objectif qui en fasse valoir l'intérêt. Intérêt que notre étude a ainsi pour ambition d'examiner, à travers la question suivante : *l'émergence dans le paysage urbain et constructif de la transition numérique, du BIM et de ses pratiques peut-elle représenter une opportunité d'améliorer les performances prévisibles de la transition énergétique du parc et la durabilité des rénovations en phase de gestion-exploitation ?*

Au caractère transversal de notre approche doit être juxtaposée une vision à la fois multi-scalaire et transcalaire, la démarche multi-scalaire s'attachant à traiter les différentes échelles et unités de temps, d'espace, ou d'observation tandis que l'approche transcalaire en souligne les points d'interconnexion. Ceci afin de balayer la dépendance qui existe entre les solutions techniques disponibles, leurs niveaux d'application, les temporalités associées (de la seconde à l'année, du renouvellement des composants au cycle de vie des bâtiments...). Les dynamiques des transitions énergétique et numérique peuvent-elles se conjuguer pour faciliter notre route vers la sobriété de nos constructions ? Quelles alternatives ou leviers de performance le BIM propose-t-il pour renforcer des positions économiques, éthiques, sociales environnementales engagées ?

Le quartier, la ville, le territoire sont autant de périmètres susceptibles de proposer et d'intégrer une politique d'adéquation durable entre énergies, construction, technologies et urbanisation. Toutefois le parc locatif, parce qu'il relève de dynamiques spécifiques, propres aux activités de gestion de patrimoine et de gestion locative, nous intéresse davantage, notamment car il existe des leviers. Soumis aux dynamiques d'offre/demande, le gestionnaire sera plus sensible à la qualité de son parc (pour en maximiser l'occupation) qu'un propriétaire occupant pour qui les leviers d'incitation seront plus difficiles à mettre en place (retour sur investissement peu intéressant pour un particulier). Notre vision s'inspire du profil économique, technique et managérial de l'organisation gestionnaire de patrimoine immobilier. Celle-ci est en effet une pièce maîtresse de la conception/construction/rénovation durables en cela que les missions de Maîtrise d'Ouvrage et de Gestion d'Exploitation qui lui incombent sont au cœur des problématiques de moyens, de performance, de rentabilité engagées par la prise de décision stratégique en matière de transition numergétique.

Dans ce premier chapitre, nous avons établi le lien étroit bien qu'indirect qui existe entre transitions numérique et énergétique. D'un côté, les questions sur les dépenses énergétiques objectives (relation avec le confort, perspectives financières ou macro-économiques, coefficient de conversion énergétique, coût du kWh évité...) témoignent de notre difficulté à faire de la performance énergétique

une valeur mobilisatrice pour la rénovation dans le modèle économique actuel. De l'autre, la rupture technologique BIM engendre un temps d'adaptation nécessaire, lié à la fois à une nouvelle forme de management, collaboratif, standardisé, numérique et à la prise en main d'un environnement de travail auquel les opérateurs doivent s'adapter. Les curseurs ainsi positionnés semblent *a priori* défavorables à une transition *numergétique*. Et pourtant, les promesses faites de part et d'autre laissent à penser qu'il existe un gisement potentiel élevé. La prise de décision gagnerait-elle à être globale ? Comment représenter cette question complexe et la diversité des sujets qu'elle engage ? Comment exprimer ce qui rapproche énergie et numérique sans ignorer ce qui les distingue et les caractérise ?

5. Synthèse du chapitre 1 : éclairer la décision complexe

Le numergétique est par essence une vision pluridisciplinaire, énergie et numérique. Or le présent chapitre met clairement en évidence les facteurs humains et économiques mis en jeu par l'introduction de la rénovation et du BIM dans l'organisation. Ces éléments révèlent la complexité des impacts multiples, directs et indirects, impliqués par l'une ou l'autre des transitions examinées ici. Cette forte complexité génère des incertitudes et des difficultés évidentes d'appréhension des retombées économiques, sociales et techniques. L'objet des travaux présentés dans ce qui suit sera donc de proposer une représentation **systémique** de ces questions, en cherchant à associer énergie et numérique au sein d'une même sphère décisionnelle, autour d'une stratégie cohérente de gestion de parc : c'est le SORON, le Système Objet de la Rénovation Orientée Numérique, objet de notre vision numergétique.

Les transitions énergétique et numérique ont cela en commun d'être des transitions ayant des impacts à toutes strates spatiales de la société, de l'individu aux dynamiques internationales, en passant par les organisations et sans distinction. Toutefois ces différentes sphères ne subissent pas les mêmes effets. On cherchera donc à représenter notre question dans une vision **multi-échelle**. Le terme de transition est à interpréter comme phénomène de temps long. Notre recherche ne pourra qu'impliquer la dimension temporelle pour une analyse prospective et **dynamique**. On cherchera à produire un modèle quantifié pour l'évaluation et l'analyse des impacts conjoints des transitions numérique et énergétique sur le parc et l'organisation. L'objectif sera de montrer la nature du (des) lien(s) entre énergie et numérique, sa force, sa viabilité et son intérêt dans une stratégie numergétique de gestion patrimoniale. **MACARON** (Modèle d'Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique) formalisera les résultats de ces travaux de recherche qui visent à :

- Élaborer une vision systémique de la transition numergétique intégrant les contraintes des organisations et des objets techniques auxquelles elles s'intéressent ;
- Proposer une modélisation de la complexité des interrelations directes et indirectes entre transition énergétique et transition numérique ;
- Développer une approche dynamique de ces transitions, permettant notamment de combiner temps court et temps long ;
- Structurer cette représentation aux différentes échelles sociétales.

Pour contribuer à lever ces verrous scientifiques, les travaux de recherche présentés dans ce qui suit s'appuieront sur les principes et les méthodes de la modélisation systémique pour ordonnancer un modèle en deux niveaux d'intervention MICRO (objet technique) et MESO (organisation) pensés dans une vision plus large. Différents scénarios d'exploitation seront successivement construits pour comprendre et analyser les interrelations propres à la transition numergétique et pour démontrer la faisabilité de cette modélisation systémique dans une vision élargie.

Le chapitre suivant produit l'état de l'art des méthodes et outils disponibles pour répondre à cette ambition dans le respect des objectifs et contraintes de modélisation d'ores et déjà identifiés au présent chapitre.

CHAPITRE 2

BIM ET RENOVATION ENERGETIQUE : INVESTIGATION PAR LA SCIENCE DES SYSTEMES

*« Mieux vaut prendre le changement par la main
avant qu'il ne nous prenne par la gorge. »*
Winston Churchill

1. MODELISATION SYSTEMIQUE ET METHODES ASSOCIEES.....	49
1.1. ANALYSE SYNTHETIQUE DES PRINCIPALES METHODES DE MODELISATION SYSTEMIQUE	49
1.1.1. Méthode MLP (Multi-Level Perspective)	51
1.1.2. Méthode DSC (Dynamique des Systèmes Complexes)	51
1.2. SELECTION D'UNE METHODE DE MODELISATION	53
2. OUTILS CONCEPTUELS DE L'APPROCHE SYSTEMIQUE	53
2.1. SYSTEME	54
2.2. COMPLEXITE	57
2.3. INTERACTION DYNAMIQUE	57
2.4. GLOBALITE.....	59
3. DEMARCHE DE MODELISATION SYSTEMIQUE	59
3.1. MODELISATION QUALITATIVE	59
3.1.1. Démarche conceptuelle.....	59
3.1.2. Outils d'investigation systémique.....	60
3.1.3. Diagrammes causaux.....	62
3.2. MODELISATION QUANTITATIVE.....	62
3.2.1. Diagrammes de flux	62
3.2.1. Plateformes de modélisation dynamique.....	64
4. VALIDATION DES MODELES	65
5. SYNTHESE DU CHAPITRE 2 : CHOIX D'UNE METHODE SYSTEMIQUE	66

La transition numergétique suppose un changement de paradigme et une mutation profonde de nos processus de construction traditionnels. Le chapitre précédent révélait le besoin de faire émerger de nouveaux modèles de compréhension de cette transition sociotechnique majeure pour éclairer la création des stratégies énergétiques et numériques de demain. Représenter, puis mesurer les effets de ces stratégies nécessite de pouvoir modéliser, dans toute la complexité qui les caractérise, les différents aspects de la transition numergétique et de ses pendants humains et économiques. Ce chapitre explore la littérature scientifique et technique dédiée à la modélisation et à l'analyse de problèmes complexes dans le but d'identifier des méthodes et outils appropriés pour représenter et étudier le Système Objet de la Rénovation Orientée Numérique (SORON). Notre recherche bibliographique se concentre sur un état de l'art de méthodes compatibles avec nos objectifs de modélisation de MACARON (Modèle d'Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique), objet de ces travaux de thèse, tels que nous les avons identifiés au chapitre 1 :

- Représentation (modélisation) et analyse (simulation) systémique d'un problème complexe,
- Dimension spatiale autorisant la modélisation multi-échelle,
- Dimension temporelle intégrant la modélisation dynamique.

Le présent chapitre recense les outils et méthodes dédiés à la problématisation de questions complexes et à leur résolution. On détaillera la méthodologie, les moyens de construire et d'exploiter le SORON propres à la méthode retenue.

1. Modélisation systémique et méthodes associées

1.1. Analyse synthétique des principales méthodes de modélisation systémique

La littérature foisonnante sur les aspects de l'aide à la décision et de la modélisation intégrée nous permet d'inventorier un panel de six principales méthodes de modélisation des problèmes complexes susceptibles de présenter un intérêt au regard de notre question de recherche. Notre synthèse des principales méthodes de modélisation systémique présentée en Table 3 page suivante s'appuie sur les travaux suivants :

- (Kelly (Letcher) et al., 2013) recensent et analysent les principales méthodes de modélisation et d'évaluation intégrées utilisées pour la modélisation de systèmes énergétiques ;
- (Lyons et al., 2003) réalisent la comparaison de trois méthodes de problématisation de systèmes complexes pour la prise de décision stratégique ;
- (Bérard, 2010) fournit comme (Lyons et al., 2003) un état de l'art orienté vers le processus de décision et les méthodes présentées y sont sensiblement identiques ;
- (Papachristos, 2019) analyse et compare deux méthodes de modélisation des transitions socio-techniques ;
- (Köhler et al., 2018) s'intéressent également à la modélisation des transitions et présentent six méthodes : deux sont orientées *économie*, deux autres *systèmes sociaux*, les deux dernières *science des systèmes complexes* ;
- Les travaux de (Thorel, 2014) nous permettent d'inclure ici la notion de modélisation de la connaissance, nous n'avons toutefois retenu des méthodes analysées par (Thorel, 2014) que celles intégrant le caractère dynamique des systèmes ;
- (Elsawah et al., 2017) analysent les six mêmes méthodes que (Kelly (Letcher) et al., 2013) mais leur analyse comparative se place dans une perspective de modélisation des transitions.

Table 3. Principales méthodes de modélisation intégrée dédiées à la modélisation des transitions et à l'aide à la décision.

Méthodes	(Thorel, 2014)	(Kelly (Letcher) et al., 2013)	(Köhler et al., 2018)	(Lyons et al., 2003) (Bérard, 2010)	(Papachristos, 2019)	(Elsawah et al., 2017)
Dynamique des Systèmes		•	•	•	•	•
Réseaux bayésiens	•	•				•
Composants couplés		•				•
Systèmes multi-agents		•		•		•
Réseaux neuronaux	•	•				•
Multi-Level Perspective			•		•	
Autres	•		•	•		

D'après notre revue de littérature, ces méthodes sont utilisées dans de nombreux domaines d'application, et explicitement présentées comme adaptées à l'étude des sciences sociales et managériales complexes. On s'appuie, pour confronter ces méthodes à nos objectifs de modélisation, sur la méthode et les critères de classification et de sélection proposés par (Kelly (Letcher) et al., 2013), que l'on adapte en Table 4 pour nos besoins en les alignant avec les caractéristiques des systèmes de transition introduits au chapitre 1.

Table 4. Synthèse des caractéristiques de modélisation des méthodes systémique recensées.

Méthodes	Applications (but modèle)					Traitement de données		Traitement de l'espace		Traitement du temps		Analyses	
	Prédiction	Prévision	Traitement des incertitudes	Apprentissage social	Compréhension/Exploration	Qualitatives	Quantitatives	Dimension spatiale traitée sous forme d'options	Dimension spatiale limitée ou non prise en compte	Routine	Dimension temporelle limitée ou non prise en compte	Scénarios	Optimisation
Dynamique des Systèmes				•	•		•		•	•		•	
Réseaux bayésiens	•		•	•	•	•	•		•		•	•	•
Composants couplés	•	•	•		•		•	•		•	•	•	•
Systèmes multi-agents				•	•		•		•		•	•	
Réseaux neuronaux	•	•	•			•	•		•	•	•	•	
Multi-Level Perspective				•	•		•	•		•		•	

On exclut les fonctionnalités de prédiction, de prévision, de traitement des incertitudes et d'optimisation de notre processus de sélection. En dehors des réseaux neuronaux, toutes les méthodes recensées ici possèdent le caractère exploratoire requis pour adresser notre problématique.

Toutes les méthodes autorisent par ailleurs (de manière plus ou moins aisée) la prise en compte d'échelles spatiales et la production de modèles quantitatifs, critères qui ne seront donc pas déterminants dans notre choix. On priorise en revanche les méthodes qui intègrent d'office la dimension temporelle laquelle n'est pas systématique dans les méthodes des composants couplés et des réseaux neuronaux, voire non prise en compte dans les méthodes des réseaux bayésiens et des systèmes multi-agents.

À la lumière de cette première analyse, deux méthodes retiennent particulièrement notre attention : la méthode de la Dynamique des Systèmes Complexes (DSC), et la méthode Multi-Level Perspective (MLP, littéralement perspective multi-niveaux en français).

La première est plébiscitée par les auteurs susmentionnés pour sa méthodologie rigoureuse et la richesse des ressources disponibles sur le sujet (confirmée par sa récurrence dans la synthèse en Table 3 ci-avant). La seconde, plus récente, est rarement comparée aux autres familles de méthodes dans les publications sélectionnées mais elle a la particularité d'être spécifiquement dédiée à la modélisation des phénomènes de transition socio-techniques, ce qui laisse supposer une adéquation totale à nos objectifs de modélisation de la transition numergétique.

Les sous-sections suivantes balayent les grandes caractéristiques des méthodes MLP et DSC et leur capacité à contribuer efficacement à nos objectifs de modélisation systémique de la transition numergétique.

1.1.1. Méthode MLP (Multi-Level Perspective)

La méthode MLP fournit un cadre méthodologique pour l'étude des transitions des systèmes sociotechniques. Elle traite les interconnexions et la dynamique des groupes sociaux qui influencent le changement technologique et l'inertie (Papachristos, 2019).

La méthode MLP repose sur l'interconnexion de trois niveaux de représentation d'un système sociotechnique :

- Le niveau de niche, incubateur d'innovations (Smith et Raven, 2012)
- Le régime sociotechnique : permet l'analyse de la stabilité de la trajectoire du système et des règles (économiques, culturelles, démographiques...) qui alignent et coordonnent les activités des groupes d'acteurs d'un système dans ce but (Papachristos, 2019). Cela rejoint une autre idée déjà évoquée en chapitre 1 selon laquelle les transitions prennent place au niveau de l'organisation incarnée par le régime (Geels and Schot, 2007; Köhler et al., 2018).
- Le paysage sociotechnique fournit un contexte plus large, lequel influence les dynamiques de niche et de régime (Rip et Kemp, 1998) : contexte sociétal, technique, matériel et macroéconomique qui comprend les processus sectoriels, le changement climatique et les formations géographiques, mais aussi les tendances démographiques, les idéologies politiques et les valeurs sociétales (Van Driel et Schot, 2005 ; Geels et Schot, 2007 ; Geels et al., 2011). Cet ensemble de facteurs forme un contexte que les acteurs de niche et de régime ne peuvent pas influencer à court terme. L'implication est que les tendances du paysage peuvent stabiliser ou déstabiliser les systèmes sociotechniques, comme c'est le cas du changement climatique par exemple.

(Köhler et al., 2018) indiquent que les niches peuvent être considérées comme des phénomènes de niveau *micro*, tandis que les régimes sont au niveau *meso* et le paysage au niveau *macro*. Ils prennent l'exemple la transition énergétique, laquelle est influencée tant par les accords mondiaux sur le climat (paysage, macro), les réglementations nationales ou fédérales (régime, meso) que par les initiatives locales (niche, micro). « *Les transitions dans le cadre de la MLP surviennent lorsque le régime sociotechnique est déstabilisé par des interactions entre ces trois niveaux qui renforcent ou perturbent les trajectoires sociotechniques.* » (Geels and Schot, 2007). « *Les transitions peuvent s'accélérer grâce à l'alignement des visions et des activités de différents groupes d'acteurs dans le système. La transition est finalement terminée lorsque les aspects sociaux et techniques des innovations sont intégrés dans le nouveau système sociotechnique.* » (Papachristos, 2019).

Les mécanismes sociaux constituent ainsi le cœur de la méthode MLP (Geels, 2007), laquelle attribue les transitions à des configurations d'influences causales multiples, imbriquées, qui se renforcent ou se perturbent (Geels et al., 2011 ; Papachristos, 2019). Différentes configurations d'interactions peuvent alors entraîner différentes voies de transition d'un système à l'autre (Geels et Schot, 2007).

1.1.2. Méthode DSC (Dynamique des Systèmes Complexes)

La méthode de la Dynamique des Systèmes Complexes de Jay Forrester, née aux États-Unis au début des années 50, n'est connue en France que depuis les années 70. Nombreux sont les chercheurs à avoir contribué à la science de la Dynamique des Systèmes Complexes : une large communauté, issue des domaines de la biologie, de la cybernétique, des télécommunications ou encore de l'électronique, s'est ainsi progressivement constituée autour de ce que (Karsky et al., 2002) considèrent être « [...] le paradigme scientifique unificateur qui va marquer le 21ème siècle [...] ».

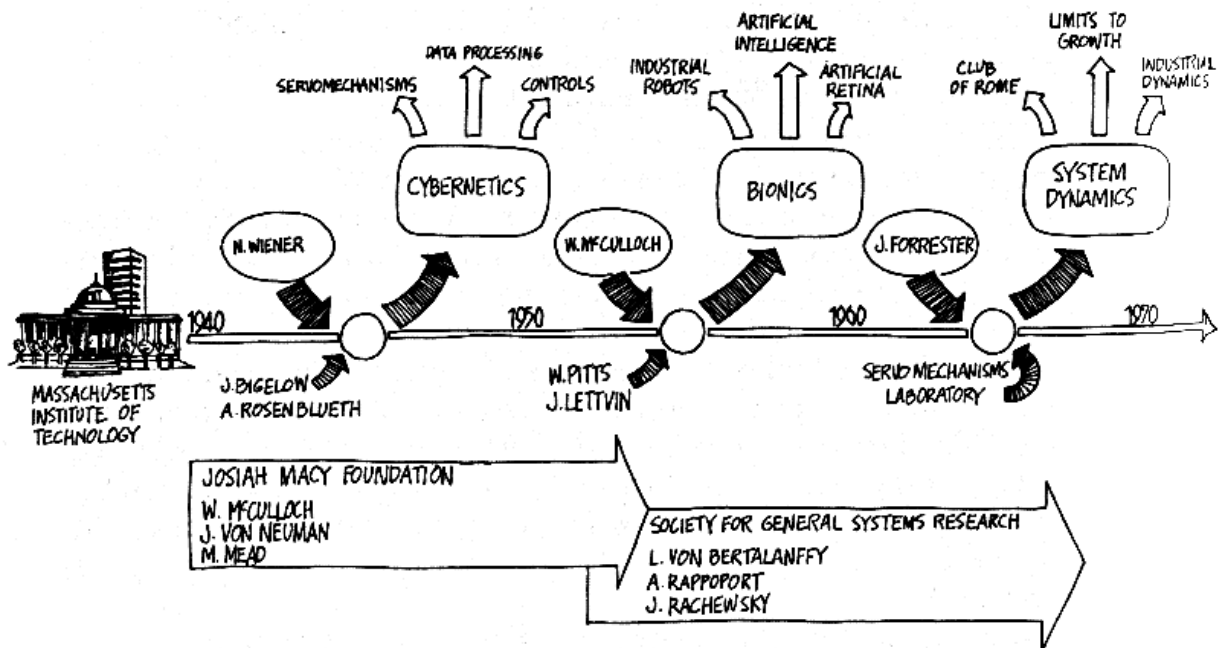


Figure 7. Histoire de la naissance de la Dynamique de Systèmes Complexes : frise chronologique.

La science des systèmes complexes prend toute sa signification dès lors que l'on ambitionne de représenter des problématiques concomitantes, et notamment des considérations relevant des sciences sociales, au sein d'un même environnement.

La méthode DSC a pour fondements l'approche systémique, laquelle, avant d'être un processus de modélisation, est une démarche réflexive destinée à s'emparer (en termes de cognition, interprétation, résolution) d'un problème trop complexe pour être abordé par des méthodes traditionnelles, linéaires, analytiques ou statiques (Bolwig et al., 2018). Dédicée à la formalisation de notre perception du monde et de sa complexité, cette méthode est utile pour faire d'un problème complexe un objet d'étude à part entière, avec l'objectif d'en représenter les mécanismes de fonctionnement spécifiques.

Une des applications de la DSC est ainsi l'expérimentation théorique de scénarios décisionnels car elle permet d'explorer les impacts des changements introduits par différentes configuration du système modélisé (Bérard, 2010) ; (Papachristos, 2019).

Contrairement aux méthodes MLP et multi-agents qui s'intéressent spécifiquement aux réseaux complexes d'acteurs, la DSC décrit un système en fonction de ses éléments constitutifs (Bérard, 2010; Köhler et al., 2018; Papachristos, 2019). La définition communément acceptée de J. De Rosnay décrit le système comme « *un ensemble d'éléments organisés en fonction d'un but* ». L'approche systémique s'attache donc à identifier (Donnadieu et al., 2003):

- La finalité du système : son but, les objectifs visés par ses fonctions
- Les niveaux d'organisation qui le structurent
- Les échanges entre les différentes parties du système,
- Les boucles de rétroaction dynamiques impliquées par ces échanges,
- Les facteurs d'équilibre et de déséquilibre, et possibles états stables du système.

La méthode DSC repose sur la représentation des éléments qui constituent le système complexe sous forme de stocks et de flux. À un instant donné, les stocks représentent l'état du système. Les réseaux de flux qui transitent à travers ces stocks provoquent leur évolution au cours du temps. Ce sont les variations qui se produisent à travers le système qui révèlent le comportement dynamique du système et les nécessaires conditions de son équilibre (Elsawah et al., 2017; Sterman, 2009).

1.2. Sélection d'une méthode de modélisation

Il existe une grande diversité de méthodes qui adressent la complexité, la modélisation intégrée et la modélisation des transitions. Nous avons examiné et comparé différentes approches méthodologiques axées sur les sciences des systèmes et utilisées pour la modélisation des transitions et l'aide à la décision. Notons à ce sujet que le développement d'un outil d'aide à la décision est hors de portée et injustifié pour notre objectif qui relève de l'observation des phénomènes. Nos critères de sélection, tirés de (Kelly (Letcher) et al., 2013) nous amènent à discriminer la plupart de ces méthodes : les réseaux bayésiens (pour non-prise en compte intégrée de la dimension temporelle), les réseaux de neurones (basés sur l'apprentissage, implique la disponibilité de séries de données temporelles donc intérêt nul dans l'exploration et la compréhension du système), les composants-couplés (qui comme leur nom l'indique requièrent la préexistence de composants, envisageable en énergie, pas en numérique et c'est bien l'objet de ces travaux) et les systèmes multi-agents (lesquels favorisent la modélisation des comportements individuels des acteurs quand notre sujet s'intéresse davantage aux effets agrégés de la transition numergétique).

Les méthodes MLP et DSC sont en revanche particulièrement bien adaptées aux objectifs de modélisation formulés par notre problématique. La méthode MLP est spécifiquement dédiée à la modélisation des transitions sociotechniques et s'appuie sur la modélisation de trois échelles spatiales : la niche de l'innovation, le régime sociotechnique et le paysage institutionnel. Un tel cadre de représentation est à la fois intéressant dans la conception de la structure du SORON, et contraignant puisqu'il demande une connaissance approfondie des mécanismes et règles de comportement des agents du système, ce qui s'éloigne quelques peu de nos questions de recherche. La méthode DSC est beaucoup plus permissive en ce sens, et aussi beaucoup plus alimentée : est appliquée dans de nombreux domaines de modélisation connexes à notre question de recherche, pour l'élaboration de modèles de transition énergétique (Li et al., 2015), de modèle managériaux (Bérard, 2010) ou économiques (Stermann 2009), spécifiques à l'industrie de la construction (Zhang et al., 2014), voire tout ça à la fois (Forrester, 1989, 1969). Ainsi la méthode DSC repose-t-elle sur une démarche méthodologique robuste largement éprouvée et détaillée dans la littérature récente (Donnadieu et al., 2003; Gobin, 2014; Karsky, 2004) et plus classique (Le Moigne, 1994; Morin, 1990; Von Bertalanffy, 1968 et d'autres ayant participé aux fondements de la méthode). C'est moins le cas de la méthode MLP.

À cet égard et au vu des contraintes et des possibilités qui sont les notre dans le cadre de cette thèse, le choix se porte sur la DSC. En effet, cette méthode assure l'accès à un matériel solide pour construire et enrichir notre vision du système numergétique sur la base des travaux existants dans ces domaines.

Elle offre en outre une grande flexibilité dans la formalisation progressive et adaptative des différents domaines que nous serons amenés à considérer dans ces travaux.

Les sections suivantes présentent en détail la méthodologie de modélisation par la Dynamique des Systèmes Complexes.

2. Outils conceptuels de l'approche systémique

La démarche de modélisation en DSC est étroitement associée à l'approche systémique dont elle est l'une des applications. Elle se fonde ainsi sur :

- quatre concepts fondamentaux que sont i) le système, ii) la globalité, iii) l'interaction et iv) la complexité ;
- une méthodologie qui engage une démarche systémique et des outils de conception/modélisation.

Ces quatre concepts, et la méthodologie qui les articule, constituent les outils de base pour le modélisateur de systèmes complexes. La méthodologie DSC consiste à soumettre notre question à la démarche systémique présentée dans la Figure 8 page suivante.

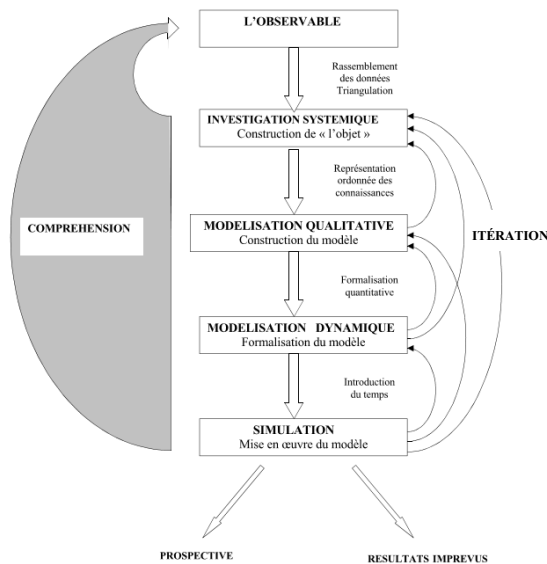


Figure 8. Modélisation systémique : étapes de la démarche.
Illustration tirée de (Donnadieu et al., 2003).

L'investigation systémique et la modélisation qualitative dégagent les hypothèses causales. La modélisation dynamique ou quantitative et la simulation permettent ensuite de développer ces hypothèses sous forme mathématique afin d'en tester la véracité ou de dégager de nouvelles hypothèses lors de la phase d'exploitation du modèle.

Les sous-sections suivantes détaillent les quatre concepts fondamentaux (le système, la globalité, l'interaction et la complexité). La démarche de modélisation sera quant à elle développée dans la section suivante.

2.1. Système

Le système désigne un ensemble de fonctions complémentaires agissant en interaction : on parle communément par exemple de *système nerveux*, *digestif* ou *immunitaire* pour décrire le fonctionnement, à une échelle plus globale, du corps humain par exemple. De la même manière, la Dynamique des Systèmes Complexes a pour but d'étudier un ensemble restreint (fini) et orienté (finalisé) de ce que l'on sait être un « tout » plus vaste. (Chu et al., 2003) donnent une excellente explication de la notion d'intrication de systèmes interpénétrés, illustrée dans la Figure 9 ci-dessous.

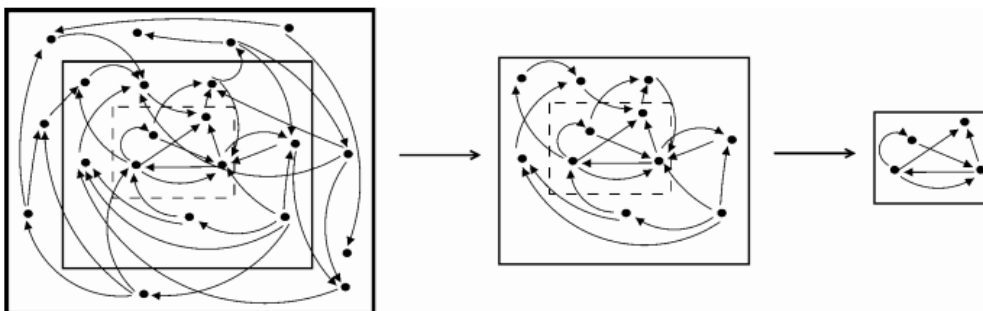


Figure 9. Intrication de systèmes interpénétrés, illustration tirée de (Chu et al., 2003)

« If the box at the right side of the figure is a model of a system representing some elements and interactions between them, then in reality this modeled system will be embedded in a larger system: the middle box. For the purpose of the model, the additional interactions that are represented in the middle box might be irrelevant. The left hand box might now again be thought of as a further opening up of the middle box. »

(Chu et al., 2003)

Tout comme le biologiste sonde le métabolisme d'une cellule et du corps dont il est consubstantiel, le modélisateur DSC veut mettre à nu les comportements dynamiques qui caractérisent le système, le nourrissent, le perturbent, le régulent.

Notre choix de faire référence ici au domaine de la médecine n'est pas innocent puisque les principes de base de la méthode DSC sont régulièrement rapprochés des processus biologiques (notons qu'en Figure 7 p.52, la biologie est partiellement à l'origine de la naissance de la science des systèmes, ensuite seulement la DSC s'est étendue à d'autres questions et d'autres ensembles). L'évocation plus haut du système nerveux fait d'ailleurs référence à J. de Rosnay qui compare dans (Rosnay, 1975) le système de guidage du canon antiaérien d'une arme à feu, au système nerveux des êtres vivants (Figure 10).

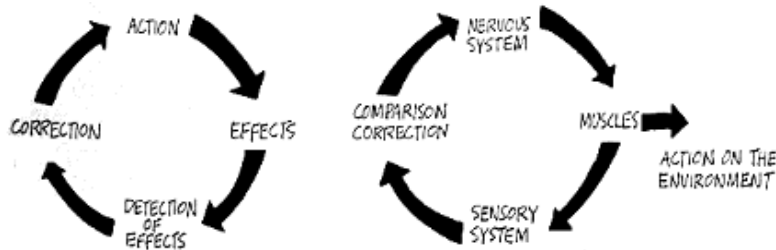


Figure 10. Système nerveux humain et système de guidage d'une arme à feu : illustration tirée de (Rosnay, 1979).

On doit également à De Rosnay l'une des définitions communément utilisées du système : « *Un système est un ensemble d'éléments en interaction, organisés en fonction d'un but* ». On explicite ci-dessous le vocabulaire et les notions phares introduites dans cette définition.

Ensemble d'éléments

Nous avons vu dans la première partie de ce chapitre que la DSC, à la différence d'autres méthodes et notamment celles basées sur la modélisation d'agents, se caractérise par l'interconnexion d'éléments. Ces éléments sont les constituants nécessaires et suffisants à la définition du comportement et de la structure d'un système. Ils peuvent représenter indifféremment des actions, des sentiments ou de la matière physique. À titre d'exemple le système nerveux selon De Rosnay, présenté en Figure 10 ci-avant, se compose de quatre éléments : ceux-ci sont nécessaires et suffisants pour exprimer à la fois la structure, les fonctions et les mécanismes propres au fonctionnement du système nerveux. L'ensemble communique grâce aux réseaux de communication : dans cette illustration ils incarnent les réseaux du système nerveux, mais dans une vision plus générale ils représentent des flux de matière, d'énergie ou d'information qui transitent à travers le système (interactions) et lui permettent de poursuivre sa finalité. Pour autant le système ne se caractérise pas par ses éléments constitutifs, mais par les interrelations qui les lient. Les constituants d'un système forment un ensemble indivisible : on dit d'ailleurs d'un système que sa totalité est différente de la somme de ses parties (concept systémique de *globalité* détaillé plus loin).

Frontière et environnement

Reprenons l'exemple de De Rosnay. Le corps humain peut être décrit sous forme de modules fonctionnels, dont le système nerveux fait partie au même titre que le système digestif par exemple. Le système digestif et le système nerveux jouent des rôles différents et complémentaires dans le fonctionnement du système global exactement comme le représente la Figure 9 ci-avant (Chu et al., 2003). Définir la frontière du système, c'est parvenir au juste découpage de ce qui fait partie du système et de ce qui appartient à son environnement, au regard d'une question spécifique. Une analogie utile est celle de la cellule vivante. Celle-ci possède un métabolisme propre, lequel repose en partie sur les échanges avec son environnement direct, le reste du corps, à travers une frontière, visuellement identifiable. Cette frontière, c'est ce qui différencie dans son métabolisme les mécanismes internes de ceux qui sont issus d'événements extérieurs. C'est ce qui définit une cellule comme « le plus petit ensemble fondamental » utile à un but précis (selon le type de cellule) dans l'organisme vivant. Si dans le cas d'une cellule, la frontière est physique, reconnaître la frontière d'un système complexe est un exercice autrement plus délicat qui demande un bornage précis de la question complexe, de la finalité du système (détaillée ci-dessous) et de l'environnement avec lequel il communique. Quels sont les « effets » du système ? Qu'est-ce qui « sépare » la question traitée, les phénomènes et comportements réellement observés, des stimuli et perturbations « extérieures » qui provoquent ces comportements ? L'influence mutuelle environnement/système se caractérise par des échanges d'information, de matière ou d'énergie : ces flux d'échanges permanents entre le système et son environnement permettent la stabilité,

l'équilibre du système dans le temps par un phénomène de régulation.

Finalité

Un système est organisé en fonction d'un but : c'est bien pour répondre à « un objectif » que le système reste en perpétuelle interaction avec son environnement. Pour rester dans le domaine du corps humain, prenons l'exemple du phénomène de transpiration. Celui-ci survient lorsque le corps tente de réguler sa température par un mécanisme sophistiqué d'évaporation à la surface de la peau. Ici la finalité du système est de garder le corps à 37°C, il provoque donc des échanges (ici, d'énergie calorifique et d'eau) avec son environnement jusqu'à retrouver une situation d'équilibre. De la même manière on peut identifier les finalités respectives des systèmes digestif, nerveux et immunitaire : assimiler les éléments nutritifs ; transmettre un signal nerveux ; assurer les défenses immunitaires... Bien identifier la finalité d'un système est essentiel pour la simplification et la mise en cohérence globale des hypothèses de modélisation autour de ce but.

Organisation

La nature des réseaux de relations entre les éléments constitutifs d'un système est intimement liée à la nature du système qu'ils structurent. De nombreuses typologies des systèmes ont été proposées par les chercheurs en sciences complexes pour permettre de décrire la structure organisationnelle des systèmes dépendamment de leur nature, de leurs fonctions et mécanismes fondamentaux associés. Citons notamment la typologie de Bunge et la classification édifée par Boulding et Le Moigne (Figure 11 ci-dessous) qui permettent de caractériser le niveau de complexité attendu/supposé d'un système. Structuré en niveaux d'organisation, le système se coordonne autour de sa finalité. Cette notion transparaît dans les classifications de Bunge et Boulding : plus la finalité est complexe, plus l'organisation du système associé l'est aussi et c'est ce qui différencie les systèmes machines, vivants, sociaux. Ces classifications soulignent le caractère hiérarchique des systèmes et la nécessaire préexistence de systèmes vivants dans l'émergence d'auto-organisations créatrices : de tels systèmes sont qualifiés de Systèmes Hyper Complexes (Donnadieu et al., 2003).

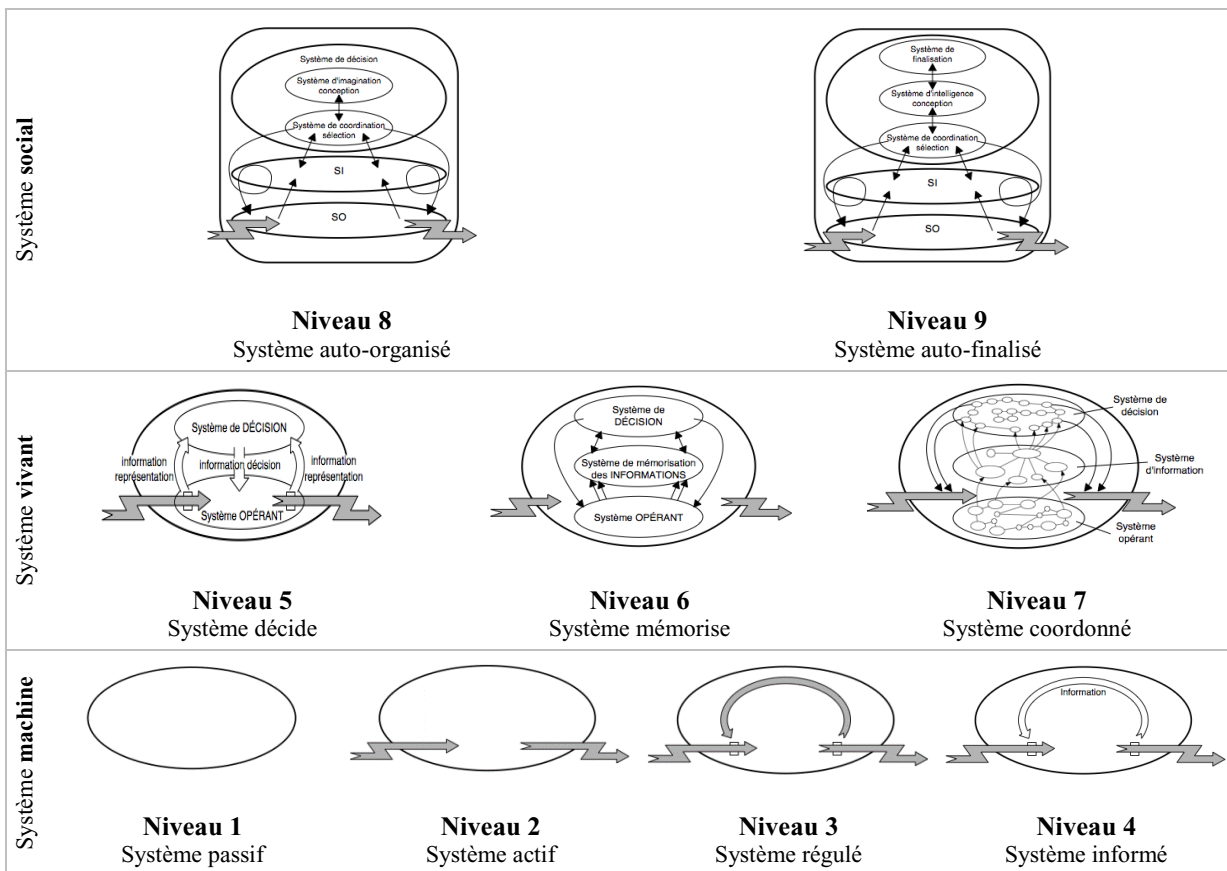


Figure 11. Niveaux de complexité selon Boulding et Le Moigne : structure complexe d'un système.

2.2. Complexité

La complexité est définie par (Donnadieu et al., 2003) de la façon suivante : « [La complexité] renvoie à toutes les difficultés de compréhension (flou, incertain, imprévisible, ambiguë, aléatoire) posées par l'appréhension d'une réalité complexe et qui se traduisent en fait pour l'observateur par un manque d'information (accessible ou non). » La méthode cartésienne, parce qu'elle s'est affranchie de cette composante du vivant, a atteint ses limites dans l'étude des grands systèmes biologiques, économiques et sociaux. Pleinement assumée dans l'exercice de la méthode DSC au motif qu'elle est indissociable de la nature du vivant, la complexité devient un outil et un levier puissants de conceptualisation.

Selon (Morin, 1990), la pensée complexe est « un ensemble de procédés qui permettent de penser le monde selon trois théorèmes : 1) La rationalité est une simplification, 2) Le simple fait partie du complexe n'est pas contraire au complexe et 3) La contradiction est au cœur de la complexité, elle ne se dépasse pas, elle s'assume. »

(Gonod, 1996) dans sa définition de la complexité oppose les systèmes *froids* et les systèmes *chauds*. Les premiers comportent un nombre d'éléments supérieur à celui des relations entre eux : ce sont des systèmes *compliqués*. « À l'inverse un système où le nombre de ses relations fonctionnelles est supérieur à celui de ses processeurs est un système complexe ou chaud. »

En effet la caractérisation d'une relation entre deux variables est beaucoup plus riche d'informations complexes que l'analyse des éléments isolés. Une variable (un élément) X peut connaître une évolution soit de type A (linéaire) soit de type B (non-linéaire). La rencontre de plusieurs comportements de type B va générer des interactions complexes entre les éléments du système. C'est dans cette notion d'interaction dynamique que réside une grande partie de la complexité des modèles et donc leur intérêt majeur.

(Karsky, 2004) associe également la complexité d'un système à la présence de boucles de rétroaction imbriquées et simultanément actives à l'intérieur du système. En effet les divergences temporelles (**Error! Reference source not found.** ci-dessus) introduites dans le modèle par les effets rétroactifs et autres relations non-linéaires entre éléments provoquent au sein du système des retards et délais qui participent selon lui grandement à en compliquer l'analyse. Les concepts d'interaction dynamique et de boucle de rétroaction sont détaillés dans la section suivante.

2.3. Interaction dynamique

La complexité d'un système repose donc non pas sur la nature de ses composants mais bien sur la nature des relations qui les lie. L'interaction dynamique est en cela l'un des piliers fondamentaux de la méthode : initialement emprunté à la mécanique « où l'interaction se réduit à un jeu de forces », le terme d'interaction dynamique en DSC décrit « la relation entre constituants se traduisant par un rapport d'influence ou d'échange » portant sur les flux qui traversent le système (Donnadieu et al., 2003). (Karsky, 2004) souligne à ce propos qu'« à la différence de la cinématique qui se limite à la description du mouvement, le concept de dynamique implique l'analyse des facteurs qui créent le changement, ou qui s'y opposent. Au-delà de la connaissance, le mot dynamique implique une compréhension des phénomènes et de leurs causes. »

Les interactions dynamiques qui existent entre deux variables d'un système engendrent des comportements prévisibles lorsqu'« isolés » dans un rapport « Force $\Rightarrow$ État » (Figure 12).

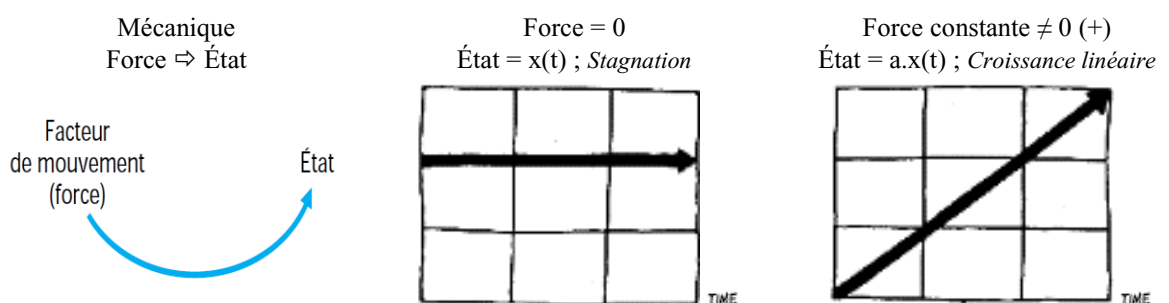


Figure 12. Rapports Force $\Rightarrow$ État, effets dans le système : illustrations extraites de (Rosnay, 1979) et (Karsky, 2004).

Toutefois, la DSC n'a pas vocation à représenter simplement des relations de cause à effet : elle prône en fait la pensée en boucle et la prise en compte des phénomènes de rétroaction tel qu'illustré en Figure 13.

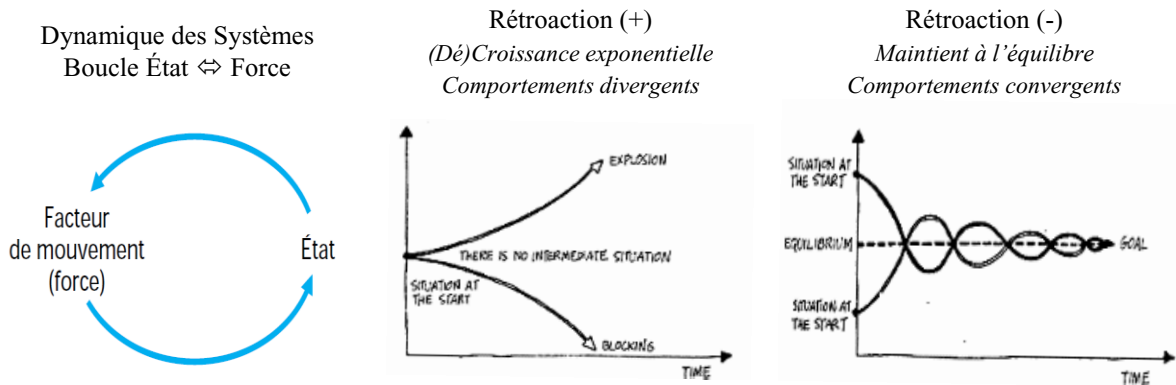
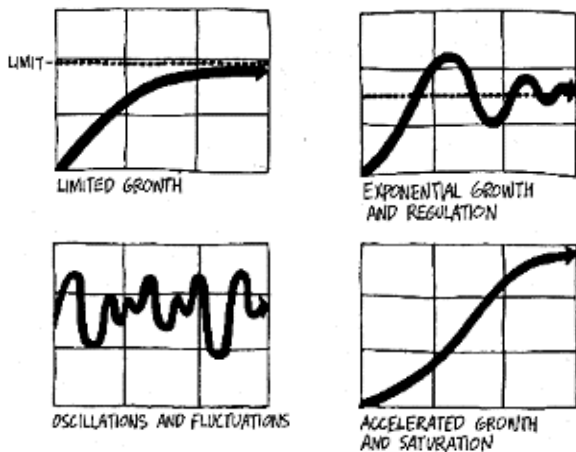


Figure 13. Boucles État $\leftrightarrow$ Force, effets dans le système : illustrations extraites de (Rosnay, 1979) et (Karsky, 2004).

On appelle en DSC boucle de rétroaction, ou *feedback* en anglais, « tout mécanisme permettant de renvoyer à l'entrée du système, sous forme de données, des informations directement dépendantes de la sortie » (Donnadieu et al., 2003). Les boucles de rétroaction positives, dites *explosives*, portent les dynamiques du changement : une *boucle de rétroaction explosive* renforce et/ou accélère un comportement (c'est ce qu'on appelle communément l'« effet boule de neige »), de sorte que si une boucle positive n'est pas régulée, le système meurt par « *explosion* » ou « *blocage* » (Rosnay, 1975). Les boucles de rétroaction négatives, dites *stabilisatrices*, s'opposent au changement et maintiennent le système dans son état d'équilibre : c'est le principe de régulation (Figure 13).

De telles boucles activées simultanément au cœur du système génèrent des comportements complexes : *oscillation*, *s-shaped*, *goal-seeking* et autres *fluctuations non-linéaires* (Figure 14) typiques. Les retards et délais ci-avant évoqués résultent de contraintes contextuelles et de règles de décision impliquées dans des boucles de rétroaction : les interventions du système ne modifient pas l'état du système instantanément, mais le « poussent » vers une certaine trajectoire (Papachristos, 2019).



« La coexistence des deux modes (boucles positives et négatives) au cœur d'un système ouvert, constamment soumis à des perturbations aléatoires de son environnement, crée une série de comportements communs. Les principaux modèles peuvent être résumés en une série de graphiques simples en prenant comme variable tout paramètre typique du système en fonction du temps. »

(Rosnay, 1975)

Figure 14. Principaux exemples de courbes de comportements dynamiques typiques en DSC.

2.4. Globalité

La globalité est le précepte systémique selon lequel « le tout est plus que la somme de ses parties » (Von Bertalanffy, 1968) (ou « moins et différent » selon (Morin, 1990)).

Ici convergent tous les concepts fondamentaux de la DSC. Notons d'abord qu'il y a bien ici un « tout » et des « parties » ce qui renvoie aux notions de frontière et d'environnement abordés ci-avant, et au découpage systémique (§3.1.1 du présent chapitre). Ce précepte de globalité selon lequel ce « tout » est « différent » de la « somme des parties », peut avoir plusieurs interprétations.

La première fait référence aux deux possibles définitions de la complexité : celle qui définit la complexité d'un ensemble comme le nombre de ses éléments ; et celle qui la définit comme le nombre de couples d'éléments (d'interactions dynamiques). La DSC se place dans le deuxième cas, et alors le nombre de couples d'éléments dans (un système, un ensemble, un « tout ») est supérieur à la somme des nombres de couples d'éléments de chaque ensemble.

Ainsi dès lors qu'on prend en compte la notion de relations entre éléments d'un tout, un système ne se réduit plus à la somme de ses parties mais produit bien un ensemble « différent ».

D'autre part, le concept de globalité attire l'attention du modélisateur sur l'importance de l'« approche globale » qui consiste à considérer tous les aspects du problème complexe « *progressivement, mais non séquentiellement* » (Donnadieu et al., 2003) : c'est selon eux le fondement de la pensée systémique de rechercher une cohérence dans la vision générale du tout et des parties, le postulat étant qu'on ne peut connaître vraiment ni l'un ni les autres sans les considérer dans leur ensemble.

3. Démarche de modélisation systémique

3.1. Modélisation qualitative

3.1.1. Démarche conceptuelle

La démarche systémique de modélisation d'un problème complexe débute par la modélisation qualitative, aussi appelée modélisation causale. Cette étape aboutit à la formalisation d'un diagramme causal (§3.1.3 du présent chapitre). Cette étape de la modélisation consiste à borner le système à travers :

- la définition de la finalité du système et donc des objectifs de modélisation,
- l'identification et la sélection des éléments représentatifs, nécessaires et suffisants pour adresser la question complexe (finalité) dans sa globalité, au regard de son périmètre (frontière),
- la caractérisation des liens de causalité qui structurent son fonctionnement,
- la formulation des hypothèses de comportements dynamiques du système, des boucles de rétroaction et des retards.

« Le système est un produit artificiel façonné par l'esprit humain » (Bérard, 2010). « Il incombe donc au modélisateur d'expliquer comment le processus de modélisation peut contribuer au problème à résoudre » (Elsawah et al., 2017). Le modèle conceptuel (modèle causal), produit de la phase de modélisation qualitative, n'a pas tant pour objectif d'analyser la réalité, que d'en concevoir une vision (Le Moigne, 1977 cité par (Bérard, 2010)). Dans cet exercice tout modèle narratif¹⁶ exprimant l'état qualitatif d'une situation complexe, peut constituer le socle de représentation des causalités du système.

« Le modèle d'un système peut être défini comme une description, qu'elle soit mentale ou figurée, une représentation figurant les éléments constitutifs du système et de son fonctionnement afin, selon le but de l'observateur, de servir de support à la compréhension du système, à l'anticipation de ses »

¹⁶ À ce sujet (Elsawah et al., 2017) décrivent différentes méthodes d'élicitation des connaissances qui peuvent être mises en place par le modélisateur pour alimenter ces modèles narratifs et le processus de conceptualisation du système. Sont cités explicitement l'analyse de données ou de documents, les résultats de verbatim et questionnaires, ou la mise en place de groupes de travail.

comportements etc. [...] Elle permet de construire des hypothèses sur le comportement probable d'un système, sur la base des connaissances que l'on en a à un moment déterminé. »

(Pirotton, 2005)

Les modèles narratifs permettent de faire émerger des comportements dynamiques historico-traditionnels ou au contraire émergents, des représentations individuelles ou collectives, ou même des contradictions et antagonismes d'opinions, d'intérêts et d'objectifs divergents ou convergents qui gravitent en son sein.

« C'est par ce processus même que s'enrichit la vision d'un système, et à cette étape de la modélisation le fait que la teneur exacte des liens de causalité soit supposée ou qu'elle ait fait l'objet de démonstrations quantifiées n'est pas à propos » pour (Donnadieu et al., 2003). Selon eux, une modélisation convaincante requiert d'ailleurs que l'examen préliminaire de la question soit réalisé *« par divers intervenants et sous divers aspects »* de sorte que la confrontation de points de vue et d'interprétations divergents fasse émerger une représentation la plus fidèle possible, bien que consensuelle, du problème.

« Often the knowledge is not explicit but tacit, so it is difficult to describe, examine, and use. Consequently, improvement of complex processes is plagued by false starts, failures, institutional and interpersonal conflict, and policy resistance. »

(Ford and Sterman, 1998)

(Ford and Sterman, 1998) soulèvent la difficulté d'investiguer de manière impartiale les multiples aspects d'un problème dont l'examen requiert d'abord de pouvoir faire émerger des éléments de connaissance tacites, puis de surmonter les conflits/résistances (ils parlent de personnels/interpersonnels ; nous pourrions élargir à conscients/inconscients).

Un des challenges majeurs du modélisateur DSC consiste alors à faire émerger un niveau de connaissance du système à la fois solide et fiable, tout en limitant les écueils liés à la subjectivité de sa conception de la question complexe à représenter. Pour parvenir à ces fins, le modéleur a accès à un éventail d'outils et de méthodes spécifiquement conçus et développés pour et par des modélisateurs artisans de *l'indiscipline intellectuelle*¹⁷, censés l'aider à structurer et formaliser la phase d'investigation du système.

3.1.2. Outils d'investigation systémique

La littérature analysée (Donnadieu et al., 2003; Elsayah et al., 2017; Gonod, 1996; Sterman, 2009) fait mention de nombreux d'outils de construction de la vision systémique auxquels elle suggère le recours. Citons de manière non-exhaustive les approches suivantes :

- le découpage systémique,
- l'analyse fonctionnelle,
- l'analyse structurelle,
- l'analyse historique du système à représenter.

Le découpage systémique est le processus réflexif par lequel on « crée » un « objet » exploitable à l'étude, quand dans la réalité les systèmes s'interpénètrent et les frontières s'effacent pour se fondre dans un tout indissociable (Donnadieu et al., 2003; Gonod, 1996). Sans qu'il fasse spécifiquement mention du découpage systémique, (Gonod and Loinger, 1994; Gonod, 1996) écrit : « La description du système consiste dans un premier temps à son découpage empirique en éléments. Mieux que des « variables », ces éléments sont pour l'analyste soit des « boîtes noires » dont on ne cherche pas à connaître la structure interne, et dont on est intéressé par la connaissance des seuls intrants et extrants, soit des « sous-systèmes » qu'on décide « d'ouvrir » en fonction de leur importance présumée, ou du nombre de relations dont ils sont le siège avec d'autres éléments ».

¹⁷ GODET Michel. *L'Avenir autrement*. Paris : Armand Colin, 1991, 208 p. ; *Manuel de prospective stratégique* (tome 1 : Une Indiscipline intellectuelle ; tome 2 : L'Art et la méthode). Paris : Dunod, 1997, réédité et augmenté en 2001.

L'analyse structurelle questionne l'organisation des divers composants du système, leur « agencement ». Ici, on s'intéresse davantage aux relations entre éléments qu'aux éléments eux-mêmes : comment les flux transitent-ils à travers le système ? L'analyse structurelle étudie :

- la frontière du système,
- les éléments qui le composent,
- les réseaux (de transport, de communication) entre ces éléments,
- les réservoirs (de matière, d'énergie ou d'information).

Prenons l'exemple d'une entreprise. Celle-ci peut être considérée sous la forme de différentes « fonctions » inhérentes à son activité. La structure de l'entreprise est associée à son organigramme, qui est la représentation plus ou moins formelle des connections qui existent entre deux fonctions de l'entreprise : qui communique avec qui ? Dans quel 'sens' (Figure 15) ?

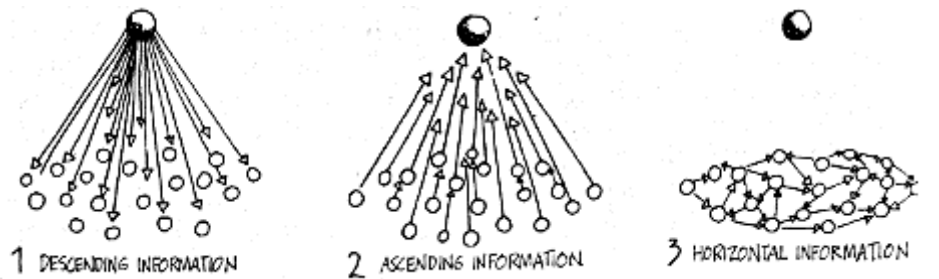


Figure 15. Illustration tirée de (Rosnay, 1979) structure du système et réseaux de flux.

La méthode MICMAC (Matrices d'Impacts Croisés Multiplication Appliqués à un Classement) développé par *La Prospective* est un outil de structuration d'une question complexe intéressant dans cet exercice. Elle ne vise pas à identifier des éléments du système ou déceler des variables constitutives, mais permet une fois ce travail achevé d'identifier et d'évaluer les relations d'interdépendances entre ces éléments. (Gonod, 1996) recommande d'ailleurs ouvertement l'association des méthodes DSC et MICMAC, ce dès le titre de son ouvrage : *Dynamique des Systèmes et Méthodes Prospectives*.

L'analyse fonctionnelle du système renvoie à l'étude et à l'identification de la nature des flux traversant le système, des centres de décision et des boucles de rétroaction qui en structurent le fonctionnement, et de ses délais de réponse caractéristiques. L'analyse fonctionnelle adresse la question du but, de la finalité du système : quels types de flux traversent le système et en quoi servent-ils la finalité du système ? À quoi sert le système dans son environnement ? Afin de répondre à ces questions, cette étape de la modélisation causale doit permettre d'identifier clairement :

- la nature des flux traversant le système,
- les centres de décision et leur fonction,
- les boucles de rétroaction structurantes,
- les délais de réponse caractéristiques du système.

L'analyse historique enfin consiste à analyser l'histoire du système lorsqu'il en possède une, ses trajectoires passées. Cette approche vise à identifier des comportements récurrents du système, leurs causes et conséquences que seule son histoire peut révéler. Toutes les questions complexes n'ont pas forcément une histoire : ce type d'analyse est plus particulièrement utile dans les modèles sociaux où elle a un rôle quasi essentiel selon (Donnadieu et al., 2003), car elle seule permettra de rendre compte de certains des aspects du fonctionnement du système social au-delà de nos modèles de croyances et de connaissances préétablis.

Progressivement, ces outils aident à formaliser la vision que l'on se fait du système : à la manière d'une carte routière, on identifie un peu mieux à chaque itération les routes principales, les nœuds importants et les sens de circulation, les heures de pointe... de ce processus d'investigation résulte une vision claire de la cartographie globale du système, laquelle demande à être formalisée.

3.1.3. Diagrammes causaux

La représentation d'un diagramme causal consiste à relier des éléments par des liens de causalité (flèches) avec des polarités (signes + et - aux poignées de flèches) et des retards.

Les liens de causalité positifs (signes +) signifient que les deux éléments liés évoluent dans le même sens (comprendre par-là, si la valeur de l'une augmente ou diminue, la valeur de la seconde augmente ou diminue de la même manière). Au contraire, les liens de causalité négatifs (signes -) signifient que deux éléments évoluent dans des sens opposés (c'est-à-dire que si la valeur de l'un augmente, la valeur du second diminue et vice-versa).

Le sens d'une relation est à distinguer de sa direction, laquelle est quant à elle clairement indiquée par les flèches et permet la représentation explicite des boucles de rétroaction lorsque deux variables ont une influence mutuelle, comme c'est le cas des *variable#1* et *variable#2* en Figure 16 ci-après.

Les diagrammes de stock et de flux assimilés reposent largement sur les diagrammes de causalité.

Rappelons à toutes fins utiles qu'une boucle de rétroaction positive provoque le renforcement d'un phénomène, tandis qu'une boucle de rétroaction négative le contrecarre et équilibre les tendances du système. Pour connaître la polarité d'une boucle, c'est-à-dire pour savoir si une boucle participe au renforcement ou à l'affaiblissement d'un phénomène, les polarités des liens de causalité (signes + et - aux poignées des flèches) sont multipliées entre elles, révélant ainsi le signe de la boucle totale.

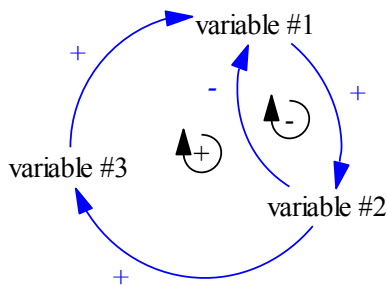


Figure 16. Représentation graphique d'un diagramme causal.

La modélisation causale couvre une grande partie de la conception du système à représenter. Les diagrammes de causalité obtenus à l'issue de cette étape de la modélisation sont un vecteur de communication solide qui permet discussion et itération sur les principaux mécanismes du système, sans avoir à rentrer dans un grand niveau de technicité. Ces diagrammes servent ensuite de socle au développement des diagrammes de flux, produits de la modélisation quantitative qui fait suite dans la démarche.

3.2. Modélisation quantitative

1.1.1. Diagrammes de flux

Si l'élaboration des modèles causaux permet de structurer la vision du système, la formalisation des diagrammes de flux et leur quantification exprime quant à elle les dynamiques du système. La modélisation quantitative identifie clairement les éléments qui constituent les flux. Ceux-ci traversent le système par les réseaux et s'accumulent dans des variables dites de stock, lesquelles représentent l'état du système : on les appelle aussi parfois *variables d'état* pour cette raison. Les flux, et donc les stocks qu'ils alimentent, subissent des perturbations ou des modifications au cours du temps par l'intermédiaire soit d'un phénomène de rétroaction, soit par l'impact d'autres éléments variables du système tels que des variables auxiliaires ou « fantômes » (*shadow variables* en Figure 17 page suivante). Ces dernières sont utilisées pour signifier la provenance extérieure d'une variable, dans le cas d'une modélisation faisant l'objet d'un découpage systémique. Elles permettent d'imbriquer des sous-modèles et d'étendre leurs dynamiques à l'ensemble d'un système. Les différents types de variables majeures des diagrammes de flux sont présentés ci-après.

Chaque élément du diagramme de flux est quantifié, sous forme mathématique, logique, probabiliste, simple ou complexe... La quantification du modèle implémente les théories, grandeurs et équations

adéquates, recueillies dans la littérature ou auprès des experts. Suite à cela, le modèle peut être simulé pour révéler la nature et les impacts précis des interrelations entre les éléments du système.

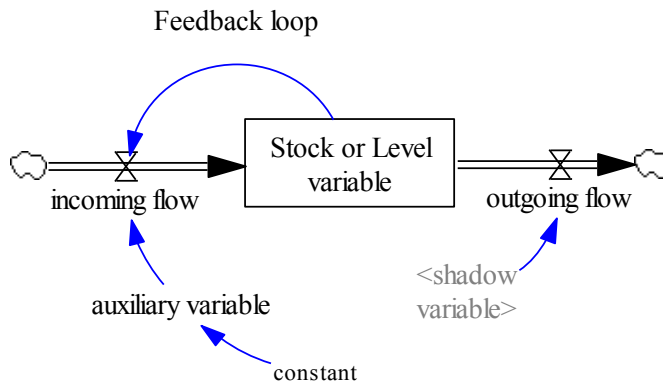


Figure 17. Représentation graphique d'un diagramme de flux.

Plusieurs types de variables sont utilisés pour la modélisation en DSC, chacun possède des fonctions propres au sein du modèle. On peut citer les variables qui seront les plus utiles à la lecture des prochains chapitres :

- Les variables *auxiliaire_t* sont calculées au pas de temps et ne se cumulent pas, à l'inverse des stocks.
- Les variables *constante* et *initiale* ne dépendent ni du temps, ni d'aucune relation causale. Ce sont des intrants qui participent à la configuration du modèle (ex : constante de Plank ou « capacité-machine » initiale).
- Les variable *stock_t* évoluent dans le temps par l'interaction de flux entrants et sortants. On les appelle également des *variables d'état*, *de niveau* ou *d'accumulation* car elles cumulent la différence de ces flux dans le temps. L'exemple le plus répandu est celui de l'évolution de la population : $pop(t) = pop(t-1) + [naissances(t) - décès(t)]$.
- Les variable *lookup_t* permettent de calculer la valeur d'un élément x non pas en fonction du temps mais en fonction de la valeur d'une autre variable y. Ces variables servent à la discrétisation de certains éléments et à la description de relations fonctionnelles non linéaires.
- Les variables *subscript* permettent l'indexation des variables du modèle.

Ni les variables *subscripts* ni les variables *lookups* n'apparaissent sur les diagrammes. Les auxiliaires, les constantes et les initiales sont représentées sans contrainte de distinction particulière contrairement aux variables de flux et de stocks qui doivent être représentés respectivement sous forme de réseaux et de boîtes.

Les équations¹⁸ suivantes montrent de manière plus formelle le modèle mathématique de base du langage Vensim. Dans les équations qui suivent, *g*, *h* et *f* sont des fonctions vectorielles arbitraires, non linéaires, potentiellement variables dans le temps.

$$(1) \quad stock_t = \int_0^T flux_t dt \quad \text{ou} \quad \frac{d}{dt} stock_t = flux_t$$

$$(2) \quad flux_t = g(stocks_t, auxiliaires_t, data_t, constantes)$$

$$(3) \quad auxiliaire_t = f(stocks_t, auxiliaires_t, data_t, constantes)$$

$$(4) \quad stocks_0 = h(stocks_0, auxiliaires_0, data_0, constantes)$$

Ces équations représentent :

- (1) l'évolution du système dans le temps,
- (2) le calcul des vitesses déterminant cette évolution,

¹⁸ Pour plus de détails sur la formalisation mathématique en DSC dans (Karsky, 2004) et (Sterman, 2009).

- (3) les résultats intermédiaires nécessaires pour calculer les flux,
- (4) l'initialisation du système.

La quantification des relations du modèle se fait à l'aide de plateformes dédiées. Ces plateformes permettent généralement à la fois la représentation graphique des diagrammes causaux, la mise en équation du système et son exploitation (simulation et potentiellement analyse des résultats).

3.2.1. Plateformes de modélisation dynamique

Il existe un grand nombre de plateformes de modélisation systémique. On cherche, sur la base de quelques considérations prioritaires pour nos travaux, si une des plateformes se démarque. La liste est volontairement limitée à :

- STELLA-ITHINK de l'éditeur ISEE systems,
- VENSIM de l'éditeur Ventana Systems, Inc,
- POWERSIM de l'éditeur Powersim Software,
- SIMILE de l'éditeur Simulistics

qui sont les principaux candidats pour répondre à notre besoin. Nous avons recensé en Table 5 les fonctionnalités pressenties comme indispensables pour couvrir tous les aspects de notre question de recherche.

Table 5. Fonctionnalités attendues de la plateforme de simulation pour nos besoins de modélisation.

Besoin identifié	Fonctionnalité attendue
Communiquer avec le format tableur	Export/import de données
Comparer les résultats des simulations	Mémoire/comparaison des simulations
Modéliser les aléas	Simulation événements discrets
Allier description fine et consolidation (parc/bâtiment)	Indexation
Explorer la sensibilité des modèles aux intrants	Analyse de sensibilité (type Monte Carlo)
Sélectionner le meilleur scénario	Optimisation multicritère

La Table 6 page suivante présente une synthèse des forces et limites caractéristiques de chacune de ces plateformes extraite de l'étude comparative menée par (Elsawah et al., 2017).

Table 6. Forces et limites des plateformes de modélisation DSC, extrait de (Elsawah et al., 2017).

Software name	Strengths	Limitations
Stella	• Story telling functionality • Extensive on-line support • Simple interface that is easy to use and learn, especially for beginners	• Difficult to build models at different spatial scales
Powersim	• Suitable for rapid prototyping of the model with stakeholders • Simple interface that is easy to use and learn, especially for beginners • Suitable for rapid prototyping of the model with stakeholders • Presentation and design mode toggles are useful for group model building • Drag and drop capabilities	• Commercial license makes it difficult to use for modifications with multiple stakeholders, and makes it difficult to share models and host online • Requires a commercial SDK license to connect other parts of a DSS • Difficult to integrate with an open source DSS architecture • Difficult to build models at different spatial scales • Limited modelling community support
Geonamica	• Suitable for large scale modelling with a high level of spatial detail • Suitable for inclusion of various spatial scales and integration of components with various spatial and temporal resolutions • User interface building blocks available for policy support • Drivers and parameters visible and adaptable • Modular framework with hierarchical model development structure	• No visual 'drag and drop' functionality for model development • Adaptations to model structure and equations need to be undertaken by an experienced programmer (except for those parts of the system where this is made available through the user interface). Therefore it is less flexible and not accessible for all modellers
Simile	• Simple interface with good documentation (manual) and sample models, making it easy to use and learn • Suitable for inclusion of various spatial scales and integration of components with various spatial and temporal resolutions	• The user interface is difficult to customize or modify
Vensim	• Models are constructed graphically or in a text editor, assisting in communication of modelling concepts and results • Useful features include dynamic functions, scripting (arrays), Monte Carlo sensitivity analysis, optimization, data handling, application interfaces etc. • Vensim DLL capability is a separate program that can be called from other applications such as Visual Basic, Delphi, Excel, and multimedia authoring tools easing the linkage with other models	• Difficult to build models at different spatial scales • License restricts the use of the software to provide web or other network services

C'est la plateforme VENSIM de Ventana system qui cumule le plus d'avantages et répond nettement mieux que ses concurrents à notre besoin. Ce logiciel présente la plupart des caractéristiques particulièrement adaptées à notre étude : interface utilisateur, fonctions d'analyse des données résultantes, export et couplage, etc. Son point faible, réside dans les conditions de licence.

En pratique VENSIM est disponible en trois différentes versions :

- VENSIM PLE est disponible en ligne gratuitement ce qui est un avantage certain sur les autres configurations. L'accès est illimité aux mises à jour des versions ultérieures, et surtout l'assistance « light » via une communauté et un forum, ressources non négligeables en particulier pour débiter en modélisation systémique. Les outils de quantification et d'analyse n'y sont pas tous disponibles, mais un grand nombre de fonctions intégrées permettent de créer, d'articuler et de simuler des modèles tout à fait convenables. À noter l'absence des fonctionnalités d'indexation des variables et d'analyse de sensibilité du modèle, desquelles nous ne saurions nous affranchir pour les deux raisons suivantes : 1) agrégation/désagrégation du parc/de l'organisation ; 2) analyse de scénarios prospectifs.
- VENSIM PRO possède une grande majorité des fonctionnalités de modélisation avancées et des outils d'analyse dont celles jugées nécessaires au développement de notre question. Cette version de Vensim est toutefois payante : de l'ordre du millier d'euro, elle comprend un an d'assistance personnalisée et de versioning gratuit, ainsi qu'un accès toujours illimité dans le temps au forum.
- VENSIM DSS augmente encore les capacités du modèle en fournissant des outils destinés à la construction de systèmes d'aide à la décision et de simulateurs d'apprentissage. Ces questions sont hors scope, les fonctionnalités dépassent nos besoins. Par ailleurs la maîtrise de tels outils suppose un temps d'apprentissage et d'expérimentation non négligeable, dans un contexte de prise en main de la méthode systémique : il n'est pas souhaitable de débiter en DSC dans un temps limité avec une plateforme de cette envergure. Le coût de Vensim DSS est en outre plus élevé que celui de Vensim Professional. Un tel investissement ne nous semble pas justifiable d'un point de vue technique au regard de nos objectifs et de notre condition de modélisateurs débutants.

Le choix final s'est porté sur la version VENSIM PRO. La version gratuite répond à une grande partie de nos attentes, et avec des outils de base très complets en termes de quantification, d'assistance et d'analyse. Si la liste restreinte des fonctionnalités de Vensim PLE a pour avantage, au contraire de la version DSS plus fournie, d'être bien adaptée à la prise en main de la modélisation systémique, l'absence des fonctionnalités d'indexation et de d'analyse de sensibilité nous pousse à discriminer cette configuration. La version Pro présente une alternative intermédiaire satisfaisante à tous points de vue.

4. Validation des modèles

La validation d'un modèle construit la confiance dans les résultats qu'il produit. Cette étape de la modélisation, aussi délicate qu'essentielle, peut être réalisée par la mise en œuvre de tests successifs : (Forrester and Senge, 1980) recensent jusqu'à dix-sept tests de validation praticables en DSC. Tous sont complémentaires et permettent de vérifier de manière progressive les hypothèses structurelles et dynamiques introduites dans un modèle ainsi que la pertinence du calibrage réalisé en phase de modélisation qualitative. La Table 7 ci-dessous relève dans (Forrester and Senge, 1980) les extraits pertinents permettant d'appréhender la structure globale de la démarche de validation d'un modèle en DSC : n'y sont détaillés que les tests « *de base*¹⁹ » explicitement identifiés par les auteurs.

Table 7. Synthèse des tests de validation *de base* en DSC, extraits de (Forrester and Senge, 1980).

Principaux tests de validation	Description synthétique <i>Extraits traduits de (Forrester and Senge)</i>
Tests de vérification de la structure	
Vérification de la structure	« Comparer les hypothèses de modélisation aux descriptions verbales des relations organisationnelles et décisionnelles trouvées dans la littérature pertinente. » « Examen des hypothèses de modélisation par des personnes hautement informées sur les parties correspondantes du système. »
Vérification des paramètres	« La vérification des paramètres consiste à comparer les paramètres du modèle à la connaissance du système réel afin de déterminer si les paramètres correspondent conceptuellement et numériquement à la vie réelle. »

¹⁹ Désignés dans (Forrester and Senge) par l'appellation de « *core-tests* ».

Conditions extrêmes	« Pour effectuer le test des conditions extrêmes, il faut examiner chaque équation de <i>taux</i> dans un modèle, la retracer à travers toutes les équations <i>auxiliaires</i> jusqu'au <i>niveau</i> (variables d'état, stock ndlr) dont dépend le <i>taux</i> , et examiner les implications du maximum et du minimum imaginaires (moins l'infini, le zéro, plus l'infini) des valeurs de chaque variable d'état et des combinaisons de variables d'état permettant de déterminer la plausibilité de l'équation de vitesse résultante. »
Adéquation de la frontière	« Ce test demande si le niveau d'agrégation d'un modèle est approprié et si ce modèle inclut toutes les structures pertinentes. Si une hypothèse plausible sur le besoin d'une structure supplémentaire est développée, le test d'adéquation des limites (frontière ndlr) n'est pas passé. Ce test nécessite qu'un évaluateur puisse unifier les critiques de limites de modèle avec les critiques de l'objectif du modèle. Souvent, les critiques sur les limites du modèle masquent des questions plus profondes sur le but du modèle. »
Cohérence dimensionnelle	« Le test de cohérence dimensionnelle implique une analyse dimensionnelle des équations de taux d'un modèle. »
Tests de vérification du comportement	
Reproduction de comportements réels	« Examine dans quelle mesure le comportement généré par le modèle correspond au comportement observé du système réel » : caractéristiques et dynamiques de comportement.
Anomalies de comportement	« En construisant et en analysant un modèle de dynamique de système, on s'attend à ce qu'il se comporte comme le système réel à l'étude; mais fréquemment, le modélisateur découvre des caractéristiques anormales du comportement du modèle qui entrent en conflit avec le comportement du système réel. Une fois que l'anomalie comportementale a été attribuée aux éléments de la structure du modèle responsables du comportement, on constate souvent des défauts évidents dans les hypothèses du modèle. Bien que le test d'anomalie de comportement soit largement utilisé dans le développement de modèles, il peut également jouer un rôle plus important dans la validation. »
Sensibilité comportementale	« Le test de sensibilité comportementale est axé sur la sensibilité du comportement du modèle aux modifications des valeurs des paramètres. Le test de sensibilité du comportement vérifie si des modifications plausibles des paramètres du modèle peuvent faire échouer les tests de comportement d'un modèle précédemment passés. »
Tests d'implication politique	
Prévision des modifications de comportement	« Ce test demande si un modèle prédit correctement comment le comportement du système changera si une stratégie de gouvernance est modifiée. »
Sensibilité aux politiques	« En plus de révéler le degré de robustesse du comportement du modèle, ce test peut également indiquer dans quelle mesure les recommandations de politique peuvent être influencées par l'incertitude des valeurs des paramètres. Ces tests peuvent aider à montrer les risques liés à l'adoption d'un modèle pour l'élaboration des politiques. Si les mêmes stratégies sont recommandées, quelles que soient les valeurs des paramètres dans une plage plausible, le risque lié à l'utilisation du modèle sera moindre que si deux ensembles de paramètres plausibles conduisent à des recommandations politiques opposées. »

5. Synthèse du chapitre 2 : choix d'une méthode systémique

Le chapitre 2 fait la synthèse de notre travail d'exploration des méthodes et de la démarche systémiques. Notre choix se porte sur la méthode DSC, technique destinée à représenter et étudier des phénomènes évolutifs multidisciplinaires dans un objectif d'analyse tendanciel. Cette méthode s'aligne parfaitement avec notre problématique, liée à l'exploration des interactions complexes entre énergie et numérique dans la transition numergétique du parc bâti existant.

Le chapitre suivant présentera notre démarche de modélisation conceptuelle, première phase de la modélisation systémique de MACARON. On y effectuera le découpage systémique, l'analyse fonctionnelle et l'analyse structurelle du SORON. On impliquera dans ce processus des experts CSTB issus de différentes divisions techniques dans le but de favoriser l'émergence d'idées fédératrices et idéalement du savoir collectif dans la définition du périmètre du SORON.

DEUXIEME PARTIE

————— Développement —————

CHAPITRE 3

LA TRANSITION *NUMERGETIQUE* : UN SYSTÈME COMPLEXE

*« Keeping it simple is probably
the most sophisticated goal in the world. »*
Steve Jobs

1. DECOUPAGE SYSTEMIQUE : STRUCTURATION DE LA PROBLEMATIQUE.....	71
1.1. ANALYSE STRUCTURELLE	71
1.1.1. Construire un modèle multi-échelles.....	71
1.1.2. Application : vision structurelle de MACARON	74
1.2. ANALYSE FONCTIONNELLE.....	76
1.2.1. Construire un modèle pluridisciplinaire	76
1.2.2. Application : vision fonctionnelle de MACARON.....	76
1.3. DIMENSION TEMPORELLE	79
1.4. OBJECTIFS DE MODELISATION DE MACARON	80
2. PERIMETRE DE L'ETUDE : INVESTIGATION DES ELEMENTS SYSTEMIQUES	81
2.1. METHODES PROSPECTIVES ET MATRICES D'INTERDEPENDANCE	81
2.1.1. Introduction générale aux méthodes prospectives	81
2.1.2. Dimensionnement, remplissage et pondération des matrices	82
2.2. INVESTIGATION DES ELEMENTS SYSTEMIQUES DE MACARON	83
2.2.1. Vue générale des matrices 4x15x15 (EP.CF.RH.DN).....	83
2.2.2. Module Performance énergétique (PE)	85
2.2.3. Module Capacité Financière (CF)	86
2.2.4. Module Ressources Humaines (RH)	88
2.2.5. Module Déploiement Numérique (DN)	89
3. SYNTHESE DU CHAPITRE 3 : DEMARCHE DE STRUCTURATION DU SORON.....	90

On cherche à produire un modèle quantifié pour l'évaluation et l'analyse des impacts conjoints des transitions numérique et énergétique sur le parc et l'organisation. Ce chapitre présente la méthodologie mise en œuvre dans l'investigation systémique du SORON : le Système Objet de la Rénovation Orientée Numérique. On s'appuiera sur l'ensemble des éléments présentés au précédent chapitre 2 pour proposer une application concrète des outils et méthodes identifiés à notre problématique.

La première partie de ce chapitre présente les résultats de notre découpage systémique du SORON. Dans cette partie on identifiera la structure et les fonctions attendues du système pour répondre aux objectifs de modélisation de la transition énergétique.

La seconde partie place notre modélisation dans une démarche prospective. On y mettra en œuvre l'approche MICMAC²⁰ afin d'identifier les interrelations qui structurent le SORON. Cette démarche nous permettra de borner notre question à un nombre d'éléments restreint et de définir, dans un processus collaboratif et itératif, les causalités utiles à la représentation de notre question complexe. Les paragraphes §2.1 et §2.2 détailleront respectivement les principes de dimensionnement du système, et les matrices d'impacts croisés obtenues au terme de la phase d'investigation du SORON.

1. Découpage systémique : structuration de la problématique

1.1. Analyse structurelle

1.1.1. Construire un modèle multi-échelles

Les échelles traditionnelles et historiques du traitement de la question énergétique et de la rénovation sont :

L'utilisateur : profil de comportement énergétique et internet des objets²¹ sont deux exemples de thématiques récurrentes et prometteuses à cette échelle. C'est une échelle de décision et d'action : l'utilisateur peut en effet se saisir, ou non, de l'opportunité numérique ou de la sobriété énergétique. Il est toutefois soumis à un certain nombre de contraintes parmi lesquelles on peut citer les contraintes réglementaires, imposées par la législation ; les contraintes d'ordre technique, celles-ci peuvent être imposées par la politique interne du gestionnaire de patrimoine dans le cas de bâtiments résidentiels collectifs ou plus simplement par les contraintes de vieillissement du bâtiment par exemple ; enfin l'utilisateur est soumis à ses contraintes propres de moyens. L'utilisateur assure traditionnellement un rôle pivot entre actions locales et orientations politiques globales.

L'objet technique *bâtiment* est une échelle centrale dans toutes les disciplines et tous les types de modèles de gestion, il a la particularité de posséder ses propres caractéristiques techniques qui font de lui un objet d'étude à part entière, mais il est aussi ou peut être constitutif d'un ensemble plus grand comme le quartier ou la ville. Les bâtiments de logements collectifs agrègent en outre les comportements individuels des usagers. Cette échelle ne porte aucun caractère décisionnel mais elle assure elle aussi un rôle pivot fondamental entre les échelles de l'individu, de la ville est du territoire en cela qu'elle est le siège de toutes les décisions infra et supra.

Les *ensembles* ou *stocks de bâtiments* font l'objet de recherches et développements intensifs, tant sur la question énergétique que dans la sphère numérique. Le quartier, la ville et le territoire sont les terrains fertiles de réflexions « macro » sur les formes architecturales et sociales des ensembles bâtis, leur performance, leur amélioration etc. Ces échelles révèlent les tendances émergentes (du quartier, de la ville, du bassin de vie, du territoire...) issues de l'agrégation de comportements individuels, en ce qui concerne les usagers, ou de caractéristiques techniques des bâtiments. C'est ensuite à cet endroit que sont produites, en conséquence, les grandes orientations stratégiques d'amélioration en matière d'urbanisme et d'aménagement par les acteurs ou groupes d'acteurs institutionnels. Dans nos travaux, le parc bâti et le gestionnaire de patrimoine immobilier qui en assure l'exploitation représentent respectivement l'objet technique et le décideur associés à cette échelle spatiale.

²⁰ Matrices d'Impacts Croisés Multiplication Appliqués à un Classement.

²¹ Ou Internet of Things (IoT) en anglais.

Puisque l'enjeu de notre modélisation de la transition numergétique comprend l'identification des interactions entre ces différents niveaux de décision et d'action, notre analyse envisage la corrélation de ces échelles spatiales aux échelles implicites contenues dans la définition du BIM 3M.

Le *BIM Model* étant l'équivalent numérique du bâtiment, il est considéré à ce titre dans MACARON comme un objet technique. Plusieurs BIM Models peuvent par ailleurs représenter un ensemble de bâtiments, qu'il s'agisse d'un quartier, d'une ville, etc, ce qui reflète pertinemment la structure spatiale mise en évidence ci-avant.

Le *BIM Modeling* est le processus même de modélisation des informations du modèle numérique BIM Model. C'est un processus opérationnel qui peut prendre place, dans une vision 100% numérique, à toutes les échelles et être rapproché de tous les acteurs à travers la notion de contribution : l'utilisateur peut contribuer à la modélisation du bâtiment ; le modèle de bâtiment BIM peut contribuer à la connaissance du parc et à sa bonne gestion ; le parc numérique peut contribuer à la smart city, etc. On identifie ici un rôle prépondérant du gestionnaire de patrimoine qui aura en charge la gestion du parc de bâtiments numériques, au même titre qu'il assure la gestion du parc physique. Sur la base des propos (Köhler et al., 2018; Papachristos, 2019) qui considèrent que les transitions prennent place à l'échelle de l'organisation, on pourra envisager d'introduire cette échelle intermédiaire dans notre représentation du SORON.

Le *BIM Management* est l'ensemble des processus collaboratifs qui régissent et organisent la circulation des informations entre les acteurs du BIM Modeling. On attribue ces aspects de la gestion et de l'organisation des réseaux de communication aux échelles organisationnelles et institutionnelles : on l'assimile, dans notre vision numergétique, à un processus décisionnel dédié à la stratégie de gestion du parc de bâtiments numériques. Or le BIM ne fait pas encore l'objet de réglementations : le rôle des acteurs institutionnels est donc encore très limité en termes de BIM Management. L'intérêt d'une échelle dédiée à l'organisation gestionnaire est une nouvelle fois mis en évidence ici pour représenter cet aspect de la stratégie BIM.

(Li et al., 2015) produisent par ailleurs un état de l'art fourni sur les modèles de transition énergétique (Socio-Technical Energy Transition, STET models), lequel complète les considérations précédentes sur les aspects propres à la modélisation des transitions. On y trouve une analyse des échelles de modélisation (niveaux structurels) et des méthodes d'agrégation des résultats utilisées pour la modélisation des systèmes STET :

« La plupart des modèles STET ont utilisé une approche système «ascendante²²», dans laquelle le modèle est construit à partir de composants à petite échelle qui peuvent ensuite présenter un comportement de système émergent à grande échelle, caractéristique des systèmes complexes. Certains modèles incluent également une structure de niveau supérieur, tels que les caractéristiques de régime et de paysage de Köhler et al. (2009) ou certains modèles de développement durable (Papachristos 2011; Moallemi et al. 2006). Les modèles d'économie d'énergie (ETSAP 2017a; Leimbach et al. 2010) représentent l'échelle macroéconomique tout en s'appuyant sur la théorie microéconomique (Köhler et al. 2006; Stehfest et al. 2014; ETSAP 2017b). »

(Li et al., 2015) font ici référence à différentes méthodes d'agrégation des résultats, ici ascendante. Pas de mention de méthodes descendantes²³, ceci est expliqué ici par le fait que la DSC a vocation à faire émerger des comportements à grande échelle. Parmi les modèles examinés dans cette publication, est mentionnée (de façon non explicite) la structure caractéristique proposée par les modèles MLP (Multi-Level Perspective), introduits au chapitre précédent, lesquels rappelons-le considèrent trois échelles de transition :

- le paysage réglementaire,
- le régime sociotechnique,
- les niches d'innovation.

La représentation de la structure systémique MLP proposée par (Papachristos, 2019) retranscrite en Figure 18 nous interpelle à deux endroits. D'abord la notion de boucle de rétroaction y apparaît comme un élément majeur de la description des niveaux MLP (notations R et B signifiant

²² Bottom-up, en anglais.

²³ Top-Down en anglais.

respectivement Reinforcing feedback loop et Balancing feedback loop, boucles positives et négatives). Les échelles structurelles du modèle doivent être pensées, comme le reste du système, à travers les possibles boucles causales qui en régissent le fonctionnement global. D'autre part la Figure 18 n'est pas sans rappeler la structure systémique du *système décide* de Boulding/Le Moigne (Figure 19). Ce niveau distingue ostensiblement les sphères opérationnelle et décisionnelle, qu'il associe dans la poursuite de la finalité du système.

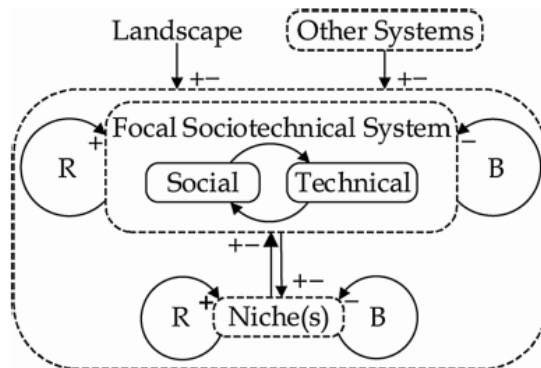


Figure 18. Structure MLP (Papachristos, 2019) : boucles de renforcement et de perturbation dans les systèmes sociotechniques.

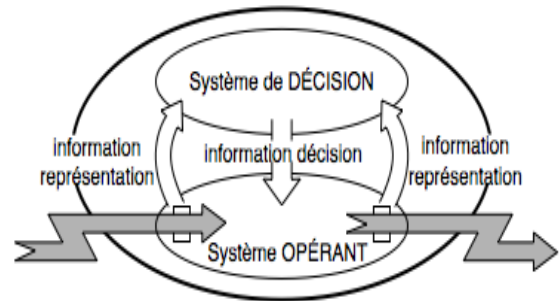


Figure 19. Structure *système décide* de Boulding/Le Moigne.

On retrouve chez (Moncada et al., 2017) un propos tout à fait similaire faisant parfaitement converger ces deux visions structurelles. Selon les auteurs la modélisation et l'analyse des transitions socio-techniques reposent sur la considération de trois piliers :

- les institutions, qui formulent les règles du jeu d'une société (objectifs et contraintes réglementaires) ;
- les acteurs, (individus, organisations, entreprises...) qui prennent les décisions et participent ainsi, par l'achèvement de leurs rôles et objectifs respectifs, aux processus de transitions ;
- le système technique (aussi appelé dans ces travaux *objet technique*) lequel réfère aux « infrastructures, technologies, artefacts, et ressources » qui sont à l'origine des flux physiques du système.

On note une nouvelle fois ici la distinction des sphères opérationnelle (relations entre acteurs et objets techniques) et décisionnelle (relations entre institutions et acteurs) du *système décide*. On peut également assimiler la vision proposée par (Moncada et al., 2017) aux niveaux MLP : « les *institutions* définissent le *paysage réglementaire* et dirigent, orientent (en termes de contraintes et d'objectifs) les interactions *acteurs-système technique* à produire » : le *régime*. « Le *système technique* fait émerger *tendances*, création de valeur et ressources à travers *l'action* des individus » : la *niche*. Est introduite ici une différenciation explicite des acteurs et des objets techniques. On trouve dans (Köhler et al., 2018) une terminologie qui pourrait permettre d'unifier ces points de vue : « *En MLP, les niches peuvent être considérées comme un phénomène de niveau « micro » alors que les régimes sont au niveau « meso » et le paysage au niveau « macro »* ».

Il donne l'exemple de la transition énergétique, influencée « autant par les accords mondiaux sur le climat, les réglementations nationales que par des initiatives locales qui s'engagent dans la production d'énergie (et bousculent les jeux d'acteurs, épaississent les réseaux et la complexité) ».

1.1.2. Application : vision structurelle de MACARON

Les différentes échelles recensées dans la section précédente mettent en exergue la distinction faite entre les sphères décisionnelle et opérationnelle dans les interactions entre objets techniques, acteurs et institutions. Les échelles de décision ou d'action examinées sont transposables dans la construction d'une vision structurelle regroupant l'ensemble de ces aspects. On cherche à produire dans la structuration du modèle, une complexification progressive du système au fur et à mesure de sa montée en échelle. Ci-dessous est détaillé en Table 8 le découpage des niveaux structurels retenu dans le traitement de notre question de recherche.

Table 8. Vision structurelle de MACARON : objets techniques, acteurs et éléments de paysage institutionnel considérés dans les objectifs de modélisation des échelles spatiales.

	Systèmes techniques	Acteurs	Paysage
NANO	Objet Technique (OT) <i>bâtiment</i>	Usagers	Politique interne de l'organisation Politiques Publiques TEPCV et PTNB
MICRO		Gestionnaire de parc	
MESO			
MACRO	Ensemble urbain <i>parc hétérogène</i>	Réseau complexe multi-agents	

La *sphère décisionnelle* se caractérise par une capacité de décision, à l'origine de l'action qui sera menée en sphère opérationnelle. La décision d'agir est conditionnée par la mesure et l'évaluation de l'information que le système décisionnel reçoit de la part du système opérant (soit directement, soit via un système intermédiaire de mémorisation, d'après la typologie de Boulding et Le Moigne). Dans notre problématique c'est par ce processus que le système opérant informe le système décisionnel de la nécessité de rénover par exemple. Dans MACARON, on distingue deux niveaux de décision qu'on assimile à deux types de sphères décisionnelles : MESO, l'organisation du gestionnaire de patrimoine, et MACRO, le système multi-acteurs de l'aménagement du territoire incluant les institutions.

- Le niveau MESO*

est le lieu de définition de la stratégie interne à l'organisation. Celle-ci inclut les politiques énergétique et numérique du gestionnaire en matière de gestion patrimoniale du parc de bâtiments homogènes. Ce niveau incarne la sphère décisionnelle propre à l'organisation, dont la finalité est d'assurer la gestion des investissements financiers stratégiques ainsi que la coordination des travaux et des circuits d'information pour l'amélioration du parc. Le gestionnaire a cette propriété intéressante d'être un acteur à la fois actif et passif dans les dynamiques d'amélioration engendrées sur le parc. Actif, car il définit sa politique interne et a donc la capacité d'être proactif ; il détient un véritable pouvoir de décision et d'action sur le parc dont il a la charge. Passif, car il subit un ensemble de contraintes extérieures sur lesquelles il n'a souvent que peu d'emprise. C'est l'environnement du système, qui peut se traduire par l'évolution des réglementations, des prix, des développements technologiques etc. Ces éléments extérieurs sont à même de modifier les impacts de la stratégie numérique appliquée par le gestionnaire, et/ou la teneur de ses décisions. Cette caractéristique du niveau MESO nous permettra de tester la réaction du système à des « configurations de futurs possibles ».
- Le niveau MACRO*

intègre les institutions, le paysage réglementaire et les multiples acteurs de l'aménagement du territoire qui structurent le système numérique hypercomplexe : ce niveau positionne MACARON dans la sphère des systèmes auto-organisés et auto-finalisés, lesquels rappelons-le sont eux-mêmes à l'origine de la conception du but à produire par le système global. Le niveau MACRO introduit en outre une diversification du parc de bâtiments homogène vers un parc composé d'objets techniques hétérogènes, comme cela est le cas dans les espaces bâtis réels. C'est à ce niveau que se produit la confrontation des tendances émergentes, des politiques individuelles et des politiques publiques contribuant à l'orientation de la finalité du système numérique.

La *sphère opérationnelle* reçoit les ordres (résultat du processus de décision) de la sphère décisionnelle et agit en conséquence de cette information, en réalisant les opérations demandées. Cela

diminue en retour les moyens et ressources disponibles pour la gestion du parc, qui sont un élément fort de la prise de décision et donc constituent une partie de l'information envoyée à la sphère décisionnelle. Notre état de l'art identifie l'évolution des besoins informationnels (volumes de données nécessaires) et humains (compétences techniques et technologiques) comme récurrents dans le questionnement BIM : ces variables pourront constituer une partie de l'environnement de notre système opérationnel. Dans notre vision, la sphère opérationnelle est incarnée par le niveau MICRO : il représente le parc homogène d'objets techniques bâtiments résidentiels collectifs et réalise les actions demandées par la sphère décisionnelle à travers le parc. On assimile par ailleurs l'individu usager/occupant à un acteur de niche qui contribue (activement ou passivement) à la mise en œuvre de la stratégie numergétique du gestionnaire et participe à l'émergence des tendances (de consommation, d'occupation etc) aux échelles supérieures : on ajoute le niveau NANO à la terminologie proposée par (Köhler et al., 2018).

- Le niveau NANO*

considère l'utilisateur comme un acteur clé de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la connaissance du bâtiment existant. Les rénovations et la numérisation (internes au système, externes au niveau) constituent l'environnement de l'utilisateur, les perturbations auxquelles il est soumis. Les jeux d'acteurs impliqués par les niveaux MESO et MACRO sont multiples et relèvent partiellement des comportements individuels des usagers. Ce niveau incarne les questions suivantes : « comment le comportement de l'utilisateur (échelle NANO) impacte-t-il la performance énergétique du bâtiment (échelle MICRO) en fonction de l'« état » dans lequel ce dernier lui aura été mis à disposition, et des directives imposées par le gestionnaire ? » ; « comment l'utilisateur impacte-t-il et est-il impacté par la stratégie numergétique du gestionnaire et de quelle manière participe-t-il à la définition des grandes orientations stratégiques du parc ou du territoire aux échelles supérieures ? ».
- Le niveau MICRO*

est l'objet technique sur lequel vont porter les décisions numergétiques : le bâtiment, et par extension le parc de bâtiments dont il est constitutif. Il articule les différents processus opérationnels de la transition numergétique, associés aux opérations de rénovation et de numérisation menées sur le parc dans notre vision du système « exploitation/rénovation BIM-centrée du parc de bâtiments existants ». Les implications du niveau MICRO dans les autres niveaux sont nombreuses : en tant qu'objet technique, il est à la fois l'objet des décisions numergétiques (individuelles, organisationnelles et institutionnelles) et leur source d'information. Il agit de ce fait en catalyseur des dynamiques de transition énergétique et numérique des niveaux inférieur et supérieurs.

En Figure 20 ci-dessous, on exprime notre problématique sous la forme du *système décide* proposée par Boulding et Le Moigne afin d'en formuler un premier modèle conceptuel. Les niveaux NANO et MACRO constituent des éléments externes à notre modélisation.

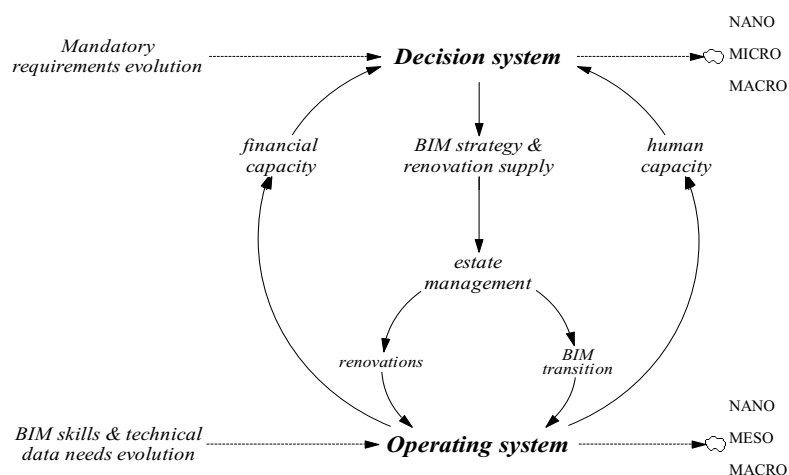


Figure 20. Adaptation personnelle des travaux de Boulding et Le Moigne à notre question complexe, sous la forme « système décide ».

Dans la section suivante, on construit selon les principes méthodologiques abordés en chapitre 2 notre vision fonctionnelle de MACARON. Seules les fonctions des niveaux MICRO et MESO qui font l'objet dans les chapitres suivants d'une analyse quantifiée, y seront détaillées.

1.2. Analyse fonctionnelle

1.2.1. Construire un modèle pluridisciplinaire

Dans leur conception du projet de construction durable, (Zheng et al., 2014) et (Li et al., 2015) font reposer leur vision fonctionnelle sur le tryptique des aspects économiques, environnementaux et sociaux/sociétaux. Les Analyses Coûts-Avantages du BIM quantitatives réalisées par (Barlish and Sullivan, 2012; Bougrain, 2018; Ghaffarianhoseini et al., 2017)²⁴ utilisent des indicateurs de performance rattachables à l'une de ces trois thématiques. On remarque l'absence d'indicateurs propres aux aspects numériques ou informatiques dans ces publications. Dans notre vision de l'écosystème numergétique, nous ajouterons cette thématique, qui fait selon nous partie intégrante de notre question de recherche, à celles introduites dans les publications examinées.

1.2.2. Application : vision fonctionnelle de MACARON

Sur la base des éléments ci-avant mis en lumière, on bornera notre modélisation à quatre thématiques fondamentales jugées nécessaires et suffisantes pour alimenter notre problématique :

- Le module Performance Énergétique (PE), dont la finalité repose sur la quête de performance énergétique,
- Le module Capacité Financière (CF), qui incarne la contrainte de capacité financière et introduit la fonction de contrôle des investissements,
- Le module Ressources Humaines (RH), la contrainte de capacité, de compétence et de disponibilité des ressources humaines affectées aux projets,
- Le module Déploiement du Numérique (DN), qui vise à objectiver la gestion du système d'information et le déploiement du BIM.

Ces quatre modules thématiques incarnent des enjeux différents à toutes les échelles définies dans MACARON. Notre vision globale du Numergystème inspirée de la représentation de l'Écosystème de (Rosnay, 1979), est illustrée en Figure 21 page suivante. Dans notre problématique, les modules CF et RH sont les *porteurs du changement* dans les projets, le module DN, le *facteur de changement* et PE la *mesure du changement*.

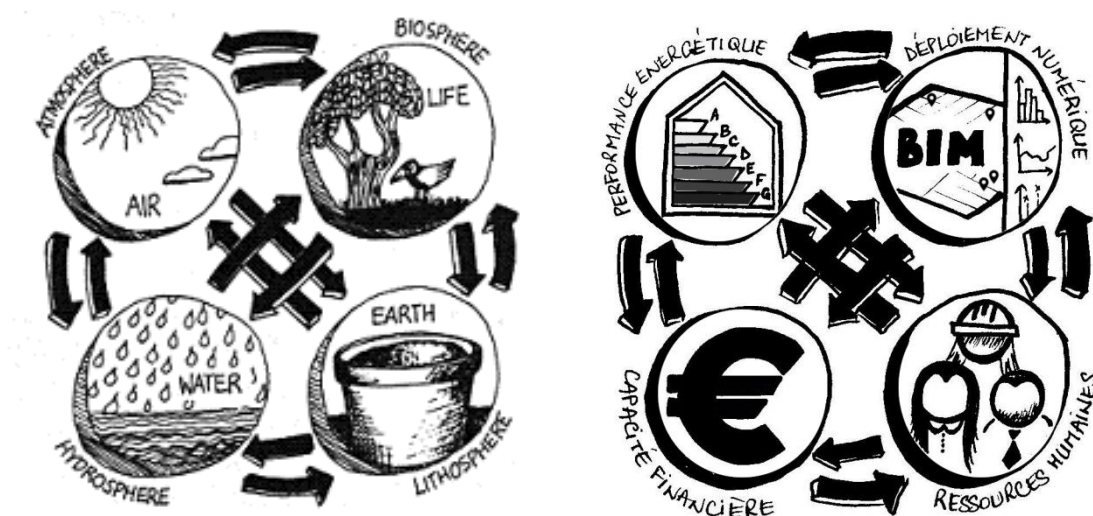


Figure 21. *The Ecosystem* de (Rosnay, 1979) et notre adaptation personnelle : *Le Numergystème*.

²⁴ Voir aussi les analyses qualitatives produites par (Cavka et al., 2017; Holtz et al., 2015; Holzer, 2011; Lee et al., 2012; Succar and Kassem, 2015; Volk et al., 2014).

On souhaite ensuite formaliser notre conception des liens fonctionnels qui structurent les interactions des niveaux MICRO et MESO, à travers les quatre modules PE, CF, RH et DN. On s'appuie sur (Rosnay, 1975) pour attribuer à chacun des modules thématiques une ou plusieurs fonctions parmi les trois fonctions majeures d'un système recensées par l'auteur :

- Fonction détection,
- Fonction comparaison,
- Fonction décision et action.

Les Figure 22, Figure 23, Figure 24 et Figure 25 ci-après traduisent et synthétisent notre vision fonctionnelle des modules PE, CF, RH, DN et des réseaux d'interactions potentiels entre les niveaux MICRO et MESO (illustrations inspirées et adaptées de (Rosnay, 1979)).

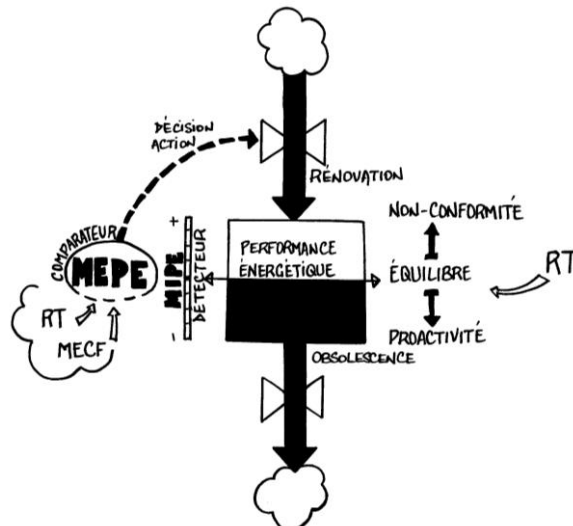


Figure 22. Structure fonctionnelle du module PE

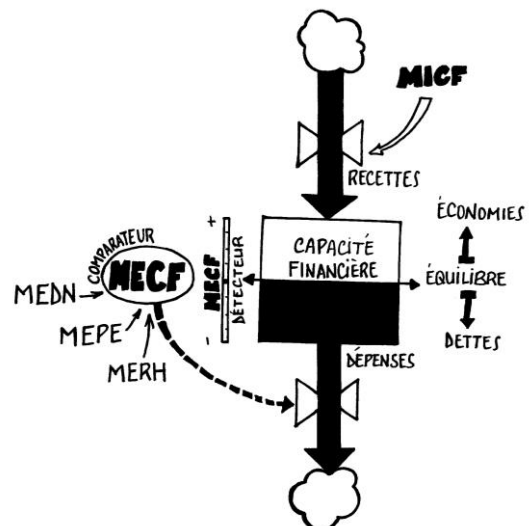


Figure 23. Structure fonctionnelle du module CF

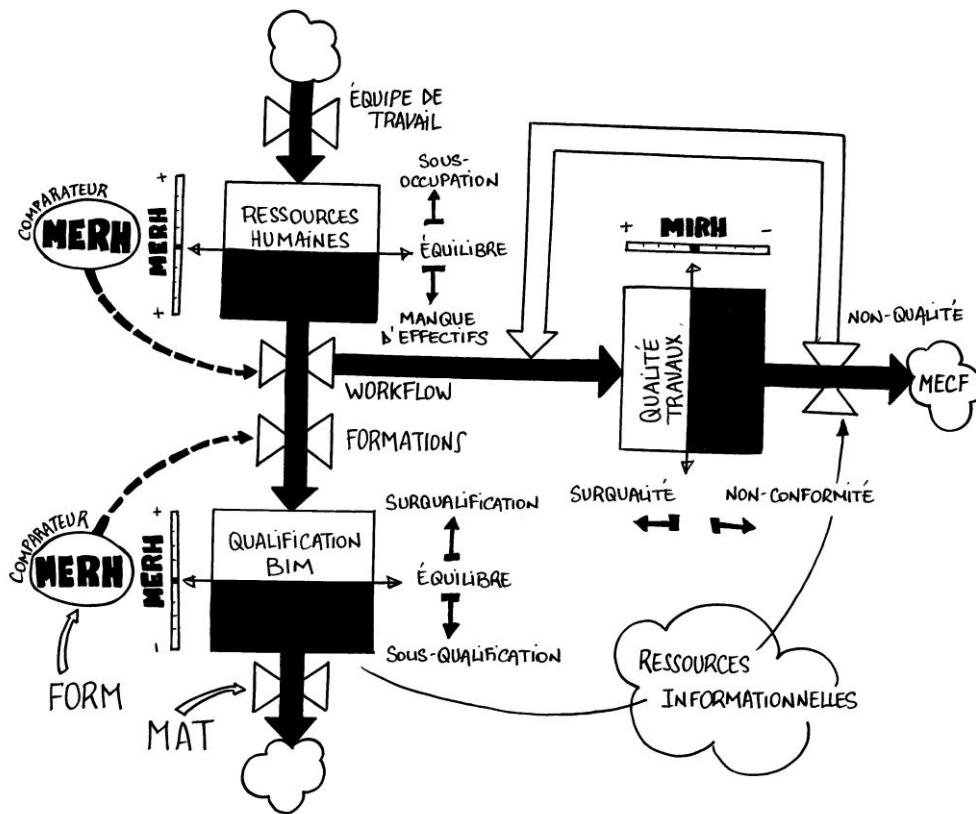


Figure 24. Structure fonctionnelle du module RH

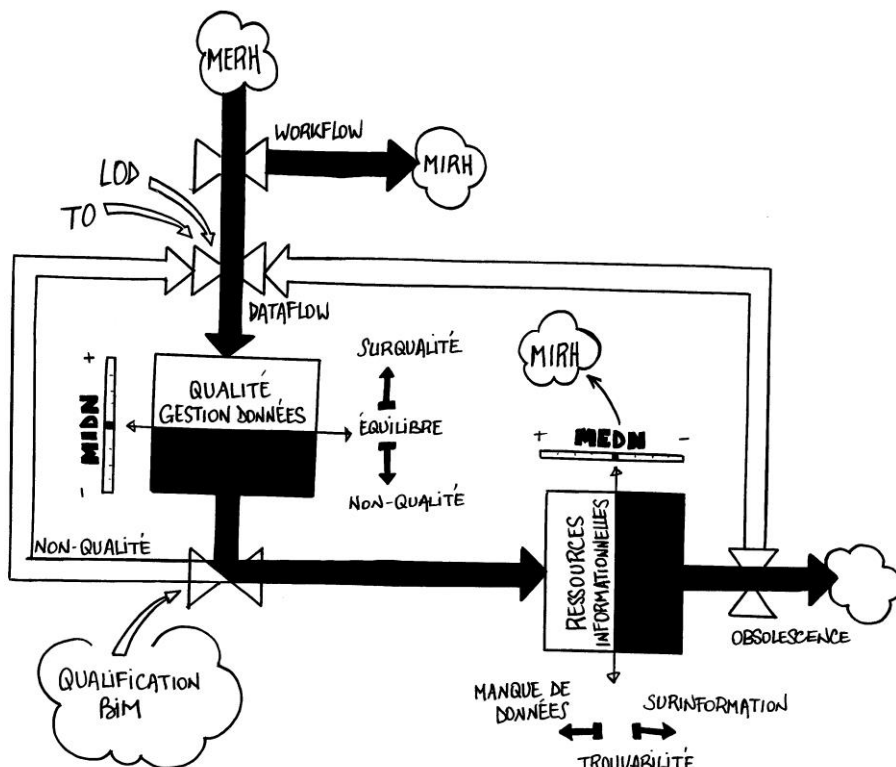


Figure 25. Structure fonctionnelle du module DN

La section suivante présente nos réflexions quant au dimensionnement temporel de MACARON, et les hypothèses retenues pour la modélisation de la transition numergétique.

1.3. Dimension temporelle

Sur un sujet tel que le BIM, une des difficultés inhérentes à la construction de modèles conceptuels est que le système étudié continue à évoluer pendant la durée de l'étude. Cet aspect est à prendre très au sérieux dans notre investigation systémique : prendre en compte des facteurs qui seront toujours source de questionnement dans trois ans, à l'issue de ces travaux, implique une vision à moyen ou long-terme dans laquelle le pas de temps mensuel ne présente pas d'intérêt. On admettra par ailleurs que la construction d'un plan pluriannuel de travaux repose sur un temps d'observation à au moins 5 ans. En outre, les grands objectifs énergétiques et environnementaux définis par l'État le sont à l'horizon 2050. À toutes ces hypothèses s'ajoute celle intrinsèquement portée par l'analyse prospective, laquelle doit pouvoir s'inscrire dans une vision à au moins trente ans (moyen-terme) pour contourner les jeux d'acteur et éclairer non pas en connaissance de cause mais en connaissance des conséquences la prise de décision complexe.

Ainsi une période de simulation d'une trentaine d'années nous paraît-elle à la fois suffisamment longue pour observer l'impact à moyen terme de différentes stratégies d'entretien-maintenance ou de rénovation du gestionnaire, tout en offrant la possibilité de nous affranchir de la problématique de la fin de vie des bâtiments (on admet généralement qu'un ouvrage est construit pour au moins quelques décennies), qui n'est pas l'objet de cette étude (mais sera envisagé en chapitre 8 la prise en compte dans le modèle des entrées/sorties de parc, démolitions et ventes).

Rappelons à toutes fins utiles que la méthode DSC ne permet pas d'introduire simplement²⁵ des échelles de temps variables dans un modèle, en particulier dans un système d'une envergure telle qu'envisagée ici. La différenciation des échelles de temps aurait pu se justifier pour les niveaux NANO/MICRO et MESO/MACRO : il aurait en effet pu être intéressant de modéliser les premiers avec un pas de temps mensuel, que l'on retrouve communément en gestion locative par exemple, et les seconds au pas de temps annuel pour répondre aux contraintes de modélisation des politiques publiques et des plans pluriannuels de travaux qui constituent le paysage réglementaire et organisationnel, lesquels incarnent explicitement des éléments pluriannuels. Ceci étant dit, la DSC permet des simulations discrètes rythmées non pas par un pas de temps constant mais par des événements, ce qui aurait pu justifier une approche axée sur l'occurrence d'aléas techniques, de besoins en rénovation, d'embauche de personnel, d'obtention de prêts, etc. Une telle approche conduirait néanmoins à un tout autre type d'analyse que celui poursuivi par MACARON et répondrait à des objectifs ne sont pas l'objet de ces travaux. Par ailleurs les données statistiques dans les secteurs économique-financiers et immobiliers sont plus facilement disponibles à l'année, et les données en GPI, si mensuelles, peuvent être consolidées. Enfin les travaux analysés par (Bolwig et al., 2018; Gonod, 1996; Köhler et al., 2018; Li et al., 2015) utilisent ou mentionnent un pas de temps annuel dans la représentation des modèles STET.

On retiendra, à la lumière des éléments ci-avant mis en évidence, que le pas de temps annuel répond davantage à notre question de recherche (qui touche à l'évaluation de la stratégie de transition numergétique du parc) et à nos contraintes de modélisation (moyen-terme et quantification statistique). Ainsi, dans MACARON la simulation démarre à $t_i = \text{INITIAL TIME} = 2018$, s'étend sur une durée de trente-deux ans ($t_f = \text{FINAL TIME} = 2050$) et prend le pas de temps annuel pour référence. La section suivante introduit, dans ce contexte, les objectifs de modélisation identifiés pour chaque sous-modèle constituant le SORON.

²⁵ La fonction TIME BASE de Vensim autorise ce genre de manipulation, mais elle n'est disponible que dans les versions PRO et DSS et ne saurait remplacer une fonctionnalité dédiée du logiciel à cet exercice.

1.4. Objectifs de modélisation de MACARON

La Table 9 page suivante présente nos objectifs de modélisation pour l'ensemble des sous-modèles théoriques de MACARON. Seuls les niveaux MICRO et MESO sont modélisés dans ces travaux : les objectifs de modélisation des niveaux NANO et MACRO sont pris en considération pour faciliter le dialogue et la construction d'une vision globale commune des objectifs de modélisation de MICRO et MACRO.

Table 9. Tableau de synthèse des objectifs de modélisation par niveau et module de MACARON.

	NANO	MICRO	MESO	MACRO
PE Performance Énergétique	Rôle et impact de l'usager-occupant dans le processus de transition énergétique et numérique du parc : gestion participative de l'information, scénarios de consommation et autres dynamiques socio-urbaines liées au confort et à l'amélioration du cadre de vie.	Objectif de performance énergétique de l'objet technique bâtiment	Stratégie patrimoniale sur un ensemble d'objets techniques	Diversification des objets techniques désormais hétérogènes. Décideurs multiples regroupant des acteurs publics et privés. Les enjeux et objectifs de chacun s'articulent autour du SI collaboratif BIM dans une recherche de performance énergétique, financière et informationnelle du parc urbain.
CF Capacité Financière		Contrainte de capacité financière	Gestion économique de l'entreprise sous contrainte de rendement des investissements financiers	
RH Ressources Humaines		Contraintes de disponibilité et de compétence des agents	Organisation des processus de gestion des patrimoines bâti et informationnel	
DN Déploiement Numérique		Objectifs de numérisation de l'objet technique et contraintes de disponibilité des données	Intégration du système d'information BIM et gestion de l'information	
Objectifs de modélisation du niveau	Comportements des usagers face aux dynamiques de numérisation et de rénovation des espaces occupés	Amélioration des performances d'un système bâtiment sous différentes contraintes de rénovation, maintenance et numérisation	Mesure de la performance de l'organisation dans la gestion du parc bâti homogène dans différentes configurations (patrimoniale et informationnelle)	Modélisation des performances énergétiques du parc urbain hétérogène soumis à une stratégie numergétique

Hors scope de ces travaux

Dans la suite on appellera :

- NA : le niveau NANO
- MI : le niveau MICRO
- ME : le niveau MESO
- MA : le niveau MACRO,

et

- PE : le module Performance Énergétique
- CF : le module Capacité Financière
- RH : le module Ressources Humaines
- DN : le module Déploiement du Numérique,

de sorte qu'un sous-modèle sera désigné par le code NIVEAU.MODULE. Par exemple, le module de Performance Énergétique du niveau MICRO utilisera le code MIPE pour désigner le sous-modèle correspondant.

Les huit sous-modèles constitutifs des niveaux MICRO et MESO, dont le développement et l'exploitation font l'objet des prochains chapitres, seront construits selon la vision fonctionnelle et structurelle du système « stratégie numergétique pluriannuelle en gestion-exploitation de parc » et les objectifs de modélisation identifiés dans cette partie. La définition du périmètre du SORON se poursuit dans les sections suivantes par l'identification de frontières et d'éléments pour chacun de ces huit sous-modèles.

2. Périmètre de l'étude : investigation des éléments systémiques

2.1. Méthodes prospectives et matrices d'interdépendance

2.1.1. Introduction générale aux méthodes prospectives

D'après une interview de F.Goux-Baudiment²⁶ (proGective), il existe quelques 300 méthodes d'analyse prospective à travers le monde. En France les concepts et méthodes les plus populaires sont d'après elle essentiellement ceux de Michel Godet (Futuribles International, La Prospective) : *Sept problèmes, Sept méthodes*. Parmi ces outils, nombreux sont ceux qui reposent sur la construction de matrices d'interdépendance. La méthode des matrices d'interdépendance consiste à identifier (et pondérer dans certains cas) les interrelations qui existent entre tous les éléments d'un système, pris deux à deux. L'enjeu fort de cet exercice est de parvenir à ne formuler que les relations directes qui traversent le système, et d'en déterminer les caractéristiques qualitatives²⁷.

Dans son ouvrage dédié à l'analyse critique des interactions possibles entre méthodes prospectives et systémiques, (Gonod, 1996) met en lumière l'intérêt de coupler la méthode des matrices d'interdépendance à la DSC. De son propos, on retient les éléments suivants :

- les matrices d'interdépendance fournissent une base pédagogique et communicationnelle intéressante à la DSC : elles pallient le manque d'une méthodologie rigoureuse de sélection et de structuration des éléments du système à considérer en proposant un support réflexif adapté à la cartographie des hypothèses de causalité. En effet l'approche par le biais des matrices engage moins de connaissances techniques préalables en modélisation systémique que la modélisation de diagrammes causaux (laquelle reste difficile à appréhender pour des néophytes).
- les matrices d'interdépendance possèdent un nombre fixe de variables déterminé dès la constitution de la matrice. Si cela rend les frontières du système plus intelligibles pour les participants, cela empêche néanmoins d'imaginer les changements de structure qui s'opèrent au cours du temps à l'intérieur d'un système (modification de la composition ou introduction de nouvelles variables comme cela se produit dans les Systèmes Hyper Complexes, voir typologies et organisation en chapitre 2). Sur cet aspect la DSC permet plus de souplesse dans la cartographie des éléments : l'évolution du système engendrée par les itérations en phase de conception s'en trouve facilitée.
- les éléments considérés en prospective sont un mélange d'événements, de phénomènes, de sous-systèmes, de processus. Ce mélange d'éléments variables et invariants (« *synchroniques/en mouvement* ») ne facilite pas la réflexion des participants sur l'anticipation des phénomènes, tandis que la DSC intègre des aspects dynamiques (flux et stocks) qui peuvent difficilement être pris en compte en prospective à part sous la notion de tendance, beaucoup plus vague.

D'une manière beaucoup plus générale, le couplage des méthodes prospectives et systémiques permet selon (Gonod, 1996) d'« *élargir le champ des représentations, de désenclaver les disciplines spécialisées et de faire émerger des relations non perçues ou jusqu'alors mal connues* ». À la lumière de ces conclusions, l'utilisation de la méthode des matrices d'interdépendance en amont de la modélisation DSC nous semble tout à fait pertinente et particulièrement appropriée au traitement de l'interdisciplinarité du modèle. En effet le cadre très opérationnel de la méthode pallie efficacement un manque à cet endroit d'outils DSC pour le découpage, le dimensionnement et le bornage du système (c'est la contrepartie d'une plus grande souplesse dans la modélisation). L'outil matriciel est en outre

²⁶ <https://www.millenaire3.com/Interview/2013/les-outils-de-la-prospective>

²⁷ Dans ce propos, très critique à l'égard des méthodes prospectives françaises, F.Goux-Baudiment oppose plus qu'elle ne rapproche les méthodes prospectives et la DSC en arguant que la seconde est un prolongement et une évolution des premières. « La première [génération de méthodes prospectives], la génération de Gaston Berger, correspond à la prospective française, qui est une pensée du 19^{ème} siècle, horizontale, savante. La pensée de la deuxième génération, celle des ingénieurs, est technologisante, encline à la formalisation mathématique. Elle a émergé dans les années 70 avec les grands modèles mondiaux de Jay Forrester, et s'est achevée au milieu des années 90. »

plus abordable que la DSC, tout en permettant d'aligner les produits des matrices avec la modélisation des diagrammes causaux.

Parmi les outils développés par *La Prospective*, on retient la plateforme MICMAC²⁸ pour la modélisation des matrices. Elle est explicitement conçue pour que la définition du périmètre et la structuration des éléments soient menées de manière participative. Cela signifie que l'on pourra mener cette analyse préliminaire auprès d'experts du CSTB affiliés aux différentes disciplines du modèle. On s'intéressera moins à l'analyse que MICMAC a vocation à produire par la pondération des relations, qu'à faire émerger chez les experts les relations causales qu'ils entrevoient dans le système numergétique au prisme de leurs propres modèles conceptuels. Cela permettra, en plus de renforcer notre analyse structurelle présentée ci-avant, de réduire le degré de subjectivité du modèle introduit par le modélisateur isolé.

Le remplissage des matrices d'interdépendance répond à un certain nombre de règles de modélisation et d'analyse, liées entre autres au dimensionnement, au remplissage et à la pondération des matrices. La section suivante synthétise les principales recommandations de (Gonod, 1996; Karsky, 2004) et nos hypothèses de modélisation sur ces aspects.

2.1.2. Dimensionnement, remplissage et pondération des matrices

Si le principe d'étudier les relations entre éléments pris deux-à-deux est simple à mettre en œuvre, il n'en reste pas moins un travail fastidieux : le nombre de relations à analyser est égal au carré du nombre d'éléments contenus par le système. Aussi la simplification du système et la rationalisation du nombre d'éléments sont-elles essentielles au démarrage de toute modélisation prospective. (Gonod, 1996) préconise pour y parvenir de séparer le diagramme complet sous la forme de plusieurs modules comportant chacun un nombre très limité d'éléments (il s'accorde sur ce point avec (Karsky, 2004) sur un nombre de 15-20 variables au plus), et de porter une attention très particulière aux interconnexions entre les modules créés. Nous avons identifié en première partie de ce chapitre quatre modules thématiques dans l'analyse structurelle et fonctionnelle de MACARON. En supposant que les niveaux ne soient pas différenciés eux-mêmes en modules spécifiques, notre écosystème numergétique totaliserait donc 4x20 éléments soit 6400 relations à analyser et renseigner. On essaiera d'être encore plus économes que les 20 variables préconisées par (Karsky, 2004) et (Gonod, 1996).

Le taux de remplissage d'une matrice devrait être contenu dans un intervalle de 15 à 25% selon une loi empirique abordée par (Gonod, 1996) qui insiste sur le constat que les matrices trop remplies sont souvent le signe d'un cas d'étude « mal défini » ou de la prise en compte inintentionnelle de relations indirectes. Il ressort toutefois du propos de (Tenière-Buchot, 1989) que le taux de remplissage maximal autorisé pour une matrice d'interdépendances peut varier de façon très importante en fonction de la taille de la matrice et de la discipline concernée par l'analyse : ainsi il n'est pas rare selon lui d'atteindre un taux de remplissage supérieur à 40% dans une matrice de 100x100 relations « dans un domaine moins technique qu'économico-social », voire plus dans le cas de matrices comportant moins d'éléments (Gonod, 1996). Dans notre cas, en particulier à l'intérieur des modules, on pourrait donc tolérer des seuils de remplissage un peu plus élevés que le taux de remplissage standard. On essaiera quoiqu'il en soit de simplifier au maximum notre vision et de respecter des taux de remplissage les plus bas possibles, en focalisant l'analyse explicative des liens représentés sur quelques hypothèses majeures de notre modèle.

La phase de remplissage des matrices d'interdépendance consiste en la pondération qualitative des impacts croisés (relations deux-à-deux) des éléments du système. MICMAC utilise pour cela la notion de force d'une relation (3, 2, 1, 0). Or ces forces ne nous sont pas utiles dans cette phase de structuration de la problématique, et seraient par ailleurs difficilement exploitables dans la phase ultérieure de quantification du modèle. D'autres méthodes matricielles utilisent une notation de type Négatif-Positif-Neutre (NPN), laquelle explicite le sens des interactions causales²⁹ (+, -, 0). Cette notation fait écho à celle employée durant la phase de modélisation causale de la méthode DSC. Beaucoup plus valorisable dans ces travaux, c'est la méthode NPN que l'on retiendra finalement pour

²⁸ Matrices d'Impacts Croisés Multiplication Appliqués à un Classement.

²⁹ Pour rappel, une interaction (+) entre deux variables signifie qu'elles évoluent dans le même sens ; une interaction (-) signifie qu'elles évoluent dans des sens opposés. Ici le neutre (0) représente une absence d'interaction.

le remplissage des matrices et la pondération des impacts croisés plutôt que l'utilisation des forces initialement prévue dans l'outil MICMAC³⁰.

2.2. Investigation des éléments systémiques de MACARON

2.2.1. Vue générale des matrices 4x15x15 (EP.CF.RH.DN)

Sur la base de notre revue de littérature, des analyses fonctionnelle et structurelle et des objectifs de modélisation présentés dans les sections précédentes, on constitue un premier jeu de variables pour chaque module thématique afin de soumettre notre question complexe aux experts CSTB selon le processus itératif présenté en Table 10.

Table 10. Consultation des experts : processus itératif mis en œuvre pour l'analyse matricielle du SORON.

	MODULE			
	PE	CF	RH	DN
EXPERTS	Benoît Vinot Mathieu Thorel Vincent Partenay Yassine Abdelouadoud Nicolas Perez	Mouchira Lahiani Sylvain Laurenceau Frédéric Bougrain	Daniela Belziti Elisa Rolland Thibaut Delval Mélanie Tual	Mathieu Marache Elisa Rolland Guillaume Picinbono Nicolas Flachet Rémi Montorio
PHASE 1	Les participants reçoivent les quatre modules sous forme de matrices vides. Y sont joints : - suggestion d'un premier set d'éléments (~20 éléments par module) ; - définitions attribuées aux éléments proposés ; - instructions méthodologiques. Les matrices sont complétées par les experts d'un module, en groupe ou individuellement, selon les contraintes de remplissage détaillées ci-après. Les participants sont invités à discuter autant le choix des variables que leurs définitions et leurs relations.			
PHASE 2	Les matrices obtenues par dires d'experts sont synthétisées et ramenées à moins de 20 variables par module. Les experts ont une nouvelle fois l'occasion de commenter ou corriger ces matrices synthétiques.			
PHASE 3	Intégration des derniers commentaires et validation des quatre matrices synthétiques à ~15 variables par module.			

On impose un certain nombre de contraintes spécifiques en plus de celles évoquées précédemment.

- Tous les modules doivent avoir un impact les uns sur les autres ce qui signifie que chacun des quatre modules doit posséder des variables provenant des trois autres, sans quoi le principe de globalité ne serait pas respecté. Il s'agit donc d'identifier des éléments « pivot » entre tous les modules. La seule exception concerne les modules PE et DN pour lesquels on souhaite n'introduire aucune causalité directe : c'est le lien que nous souhaitons explorer et l'enjeu de notre modélisation.
- Dans chaque module, une ou plusieurs variables externes doivent participer à définir la frontière et l'environnement du système.
- On souhaite que chaque module fasse appel aux deux niveaux MICRO et MESO, de sorte à assurer l'existence d'interactions entre ces échelles spatiales dans la matrice globale.

La Table 11 page suivante recense les éléments retenus à l'issue du processus de consultation des participants et la Figure 26 en page suivante également présente les matrices d'interdépendance obtenues après synthèse des dires d'experts.

Une matrice A d'impacts croisés est constituée de termes a_{ij} . a_{ij} représente l'influence (motricité) directe de la variable i sur la variable j ou la dépendance directe de la variable j vis-à-vis de la variable i. Un signe + indique que les deux variables évoluent dans le même sens, - qu'elles évoluent en sens

³⁰ Impossible de s'affranchir de la notion de force si on souhaite approfondir l'étude sous MICMAC, ce qui n'est pas notre cas ici. Raison pour laquelle on s'autorise cette liberté.

opposé, • la causalité identifiée est testée en analyse de sensibilité (chapitre 7) ou abordée dans les perspectives de développement du modèle (chapitre 8).

Table 11. Éléments constitutifs retenus pour la construction des matrices d'interdépendance du SORON.

	Capacité Financière	Performance Énergétique	Déploiement Numérique	Ressources Humaines
1(A)	PE Profil du Parc : PP	PE Politiques publiques : RT	DN Évolution des outils numériques : MAT	DN Évol. des outils numériques : MAT
2(B)	CF Valeur locative : VL	PE Prix de l'énergie : DER	RH Expérience et qualification BIM de la RH	DN Ressources informationnelles du SI
3(C)	CF Aides financières de l'état	PE Profil du Parc : PP	RH Formation à la compétence BIM : FORM	CF Coûts exploitation (gestion, RH)
4(D)	DN Évol. des outils numériques : MAT	PE Coût des travaux R	RH Qualité des travaux de M&R	RH Expérience et qualification BIM de la RH
5(E)	PE Coût des travaux R	PE Intensité des rénovations	RH Workflows (flux de travail)	RH Workforce (composition RH)
6(F)	CF Capacité Financière	PE Performance énergétique	CF Coûts ATM donnée et SI	RH Workflows (flux de travail)
7(G)	CF Revenus d'exploitation	CF Mix énergétique : MIX	DN Intensité des travaux de numérisation : LOD	RH Formation à la compétence BIM : FORM
8(H)	CF Dépenses de maintenance	PE Facture énergétique	DN Date de mise en œuvre du BIM : T0	RH Qualité des travaux de M&R
9(I)	CF Taux d'occupation/d'usage	PE Classe énergétique	DN Ressources informationnelles du SI	
10(J)	PE Classe énergétique	CF Taux d'occupation/d'usage	DN Adéquation contenus de données/activité	
11(K)	CF Coûts d'exploitation (gestion, RH)	CF Dépenses de maintenance	DN Dataflows (flux de données)	
12(L)	RH Qualité des travaux de M&R	RH Qualité des travaux de M&R		
13(M)	CF Coûts ATM donnée et SI	PE Obsolescence du bâti		
14(N)	CF Valeur verte : VV			
15(O)	* Postes d'économies BIM			

Élément exogène
 Élément endogène MICRO
 Élément endogène MESO
 * Tous modules, tous niveaux

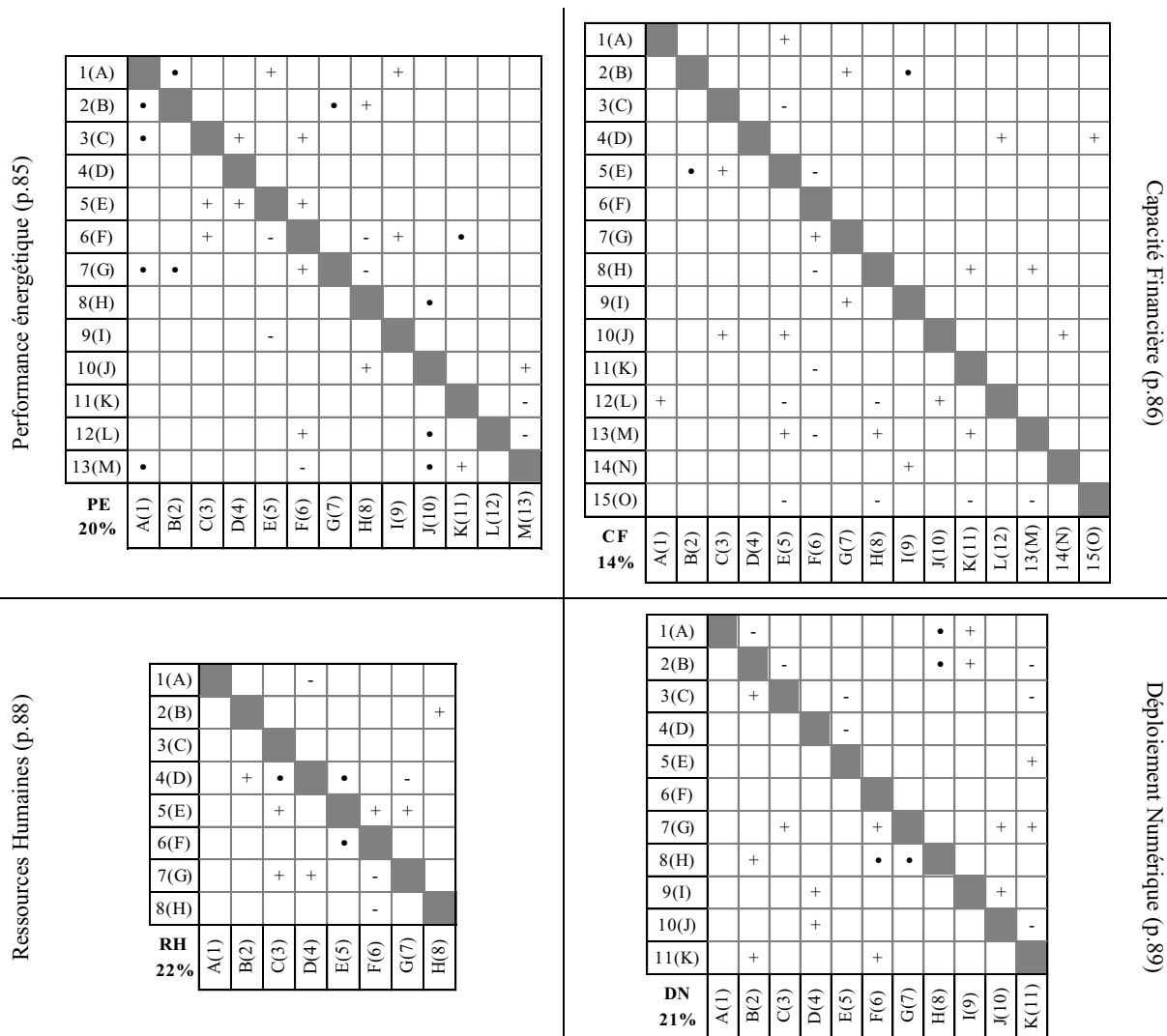


Figure 26. Matrices d'Impacts Croisés de synthèse des modules (EP.CF.RH.DN).

Les sections suivantes détaillent, pour chaque module thématique, la nomenclature des variables recensées en Table 11 ci-avant. Les éléments qui font appel à une littérature plus spécifique seront évoqués en temps voulu au cours des prochains chapitres.

2.2.2. Module Performance énergétique (PE)

Ci-dessous est détaillée la nomenclature de la matrice associée au module PE.

1(A)	Politiques publiques : RT
La variable dynamique RT représente l'évolution au cours du temps des contraintes et objectifs imposés par les politiques publiques en matière de rénovation énergétique, soit le renforcement progressif des exigences réglementaires. Plus largement, dans MACARON elle représente la politique énergétique appliquée sur le parc en vue de son amélioration. Son initialisation s'appuie sur les textes de loi en vigueur (Réglementation Thermique (MEEDDAT and MLV, 2019)) et ses possibles évolutions font l'objet d'une analyse de scénarios en chapitre 7 (SC1).	
2(B)	Prix de l'énergie : DER
Le prix de l'énergie est considéré dans MACARON comme un élément dynamique : on souhaite en effet représenter dans le modèle l'impact de l'évolution du prix des énergies dans les décennies à venir sur la capacité financière prévisible des organisations porteuses des rénovations. Son initialisation s'appuie sur les informations de la base de données Pégase (Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie) (MTES 2012) mise à disposition en ligne par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire et ses possibles évolutions font l'objet d'une analyse de scénarios en chapitre 7 (SC4). Nos hypothèses de modélisation seront présentées en chapitre 5 (MIPE).	
3(C)	Profil du parc : PP
Détaillé en chapitre 7, dans lesquels il fait l'objet d'une analyse de sensibilité, le profil de parc est un élément d'initialisation du modèle. Sa définition est à rapprocher de celle de la cartographie énergétique du parc, laquelle englobe les notions de surface, localisation et performance énergétique globale. Les données d'initialisation et les hypothèses de modélisation utilisées dans MACARON pour la représentation du profil de parc sont présentées en chapitre 6 et en annexe 4.	
4(D)	Coût des travaux de Rénovation
Somme des investissements financiers ponctuels dédiés à la remise en état d'un ou plusieurs bâtiments (selon l'échelle de l'opération). Le coût des rénovations est jugé d'autant plus important que l'intensité de ces dernières est élevée. Cette variable statique est discrétisée (le coût des rénovations ne varie qu'en fonction de l'intensité des rénovations et non du temps, hypothèse discutée en chapitre 8). Les hypothèses considérées dans MACARON sont présentées en chapitre 5 (MEPE).	
5(E)	Intensité des rénovations
La notion d'intensité des rénovations, dans le contexte de notre étude, est représentative à la fois du nombre de sauts de classe énergétiques engendrés par une opération de rénovation sur un bâtiment (gain de performance énergétique en kWhép/(m².an)) mais aussi de la classe énergétique finale du bâtiment. Plus l'engagement énergétique est fort (nombreux sauts de classe et/ou classe finale très performante), plus l'effort de rénovation est considéré intense.	
6(F)	Performance énergétique
La variable d'état qui caractérise la performance énergétique du bâtiment dans MACARON est la consommation énergétique annuelle par m² de surface unitaire d'objet technique et s'exprime en kWhép/(m².an). On choisit d'écarter la modélisation de systèmes physiques plus complexes (intégrant par exemple les usages liés aux consommations ni les différents éléments constitutifs du bâtiment responsables des déperditions (voir Système bâtiment (Gobin, 2014)) pour lesquels il existe de nombreux modèles : on sait que cette connaissance/compétence existe par ailleurs et pourra être intégrée pour répondre aux besoins de développements ultérieurs. On envisage donc la performance énergétique du bâtiment et du parc comme une boîte noire comparable au résultat d'un DPE (Diagnostic de Performance Énergétique).	
7(G)	Mix énergétique : MIX
Le mix énergétique s'exprime en pourcentage et indique la répartition des différentes sources d'énergies primaires consommées par un bâtiment.	
8(H)	Facture énergétique
La facture énergétique est le montant annuel en euro payé par les usagers en fonction de la consommation réelle d'énergie finale et du prix des énergies.	
9(I)	Classe énergétique
La classe énergétique est un système d'étiquetage obligatoire mis en place par l'Union Européenne. La classe	

énergétique donne des informations précises sur l'efficacité énergétique (mesurée en kWh d'énergie primaire par m² et par an) d'un ouvrage construit et se présente sous la forme d'une lettre, qui va de A (bâtiment économe en énergie) à G (bâtiment très énergivore).

10(J) Taux d'occupation/d'usage

Le taux d'occupation est un indicateur du secteur de la gestion locative. Il exprime la part des logements occupés sur une période ou à une date donnée par rapport au total de logements constituant le parc de bâtiments examiné. L'occupation du parc est une condition sine qua non de la rentabilité de l'activité de gestion patrimoniale.

11(K) Dépenses de maintenance

Les dépenses de maintenance correspondent au montant total annuel de dépenses en euro qu'exige le maintien des bâtiments (et de leurs composants) constituant le parc en bon état de fonctionnement. Nos hypothèses de modélisation sont présentées au chapitre 4 (MICF).

12(L) Qualité des travaux de Maintenance & Rénovation

Que les travaux engagés sur le parc bâti concernent des opérations de maintenance ou de rénovation, que ces dernières soient « énergie-centrées » ou non, il s'avère en effet que la performance énergétique d'un ouvrage est intimement liée aux stratégies d'entretien qui lui sont appliquées (Bousdekis et al., 2015; Jensen and Maslesa, 2015; Soyer et al., 2014). La variable Qualité des travaux de M&R introduit ici cette hypothèse fondamentale et se veut dans MACARON l'indicateur clé des conséquences de la stratégie numérique du décideur sur la qualité du parc et sa performance énergétique globale.

13(M) Obsolescence du bâti

La notion d'obsolescence (ou vétusté) apparaît comme essentielle dans la compréhension du phénomène de perte d'efficacité ou de valeur de toute matière physique au cours du temps (Thomsen and van der Flier, 2011) et (Zurbrugg, 2010; Gribble et Preston 1993).

Cet état de fait s'applique de la même manière lorsque l'on parle d'efficacité énergétique. La qualité intrinsèque des composants tout autant que leur niveau de dégradation influent fortement sur la performance énergétique du bâtiment, pouvant aller jusqu'à rendre ce dernier inexploitable en l'absence de mesures correctrices (Alencastro et al., 2018) et (de Wilde, Tian, et Augenbroe 2011). Dans le cas d'un bâtiment résidentiel, on parlera alors d'habitat indigne, dégradé ou insalubre (Les Cahiers de l'Anah n°145, 2015 ; Les Cahiers de l'Anah n°150, 2016).

Toutefois, la notion d'obsolescence ne se limite pas seulement à la description du phénomène naturel de dégradation progressive de la matière. L'ADEME, dans son rapport final relatif à l'étude sur la durée de vie des équipements électriques et électroniques (2012), explore différentes définitions de l'obsolescence disponibles dans la littérature. Elle cite notamment la revue *The Economist*, qui définit l'obsolescence comme un « processus par lequel un produit devient obsolète, c'est-à-dire qui n'est plus à la mode ou plus utilisable ». Cette définition de l'obsolescence met en lumière la dualité du terme, et complète parfaitement les conclusions de l'ADEME qui discerne l'obsolescence fonctionnelle (« plus utilisable ») de l'obsolescence dite d'évolution (« plus à la mode »). Ainsi l'obsolescence fonctionnelle, toujours selon la définition de l'ADEME, « correspond au fait qu'un produit ne réponde plus aux nouveaux usages attendus, pour des raisons techniques réglementaires et/ou économiques », quand l'obsolescence d'évolution « correspond au fait qu'un produit ne réponde plus aux envies des utilisateurs qui souhaitent acquérir un nouveau modèle du fait d'une évolution de fonctionnalité ou de design ».

On souhaite en effet représenter l'inadéquation de l'objet technique bâtiment au regard des exigences nationales en matière de performance énergétique : c'est cette obsolescence technologique, fonctionnelle de l'objet technique bâtiment qui nous intéresse plus particulièrement ici.

2.2.3. Module Capacité Financière (CF)

Ci-dessous est détaillée la nomenclature de la matrice associée au module CF.

1(A) Profil du parc : PP

Cf page 85.

2(B) Valeur locative : VL

La valeur locative VL, exprimée dans MACARON en euro/m² de surface de bâtiment, est le montant en euro par unité de surface applicable à la location d'un bien immobilier. Administrativement, la valeur locative correspond à un loyer annuel théorique établi par l'administration fiscale, prenant en compte certains éléments de confort sous forme de pondération de surface. Dans ces travaux on considère un montant de la valeur locative fonction de la localisation du bâtiment, mais pas de sa performance énergétique ni de considérations qui concerneraient un niveau NANO : confort, environnement proche... Ces hypothèses seront discutées en chapitre 8. Dans ces travaux la sensibilité du modèle au montant de la valeur locative et des revenus d'exploitation qu'elle engendre sera analysée en chapitre 7.

3(C) Aides financières de l'état

Montant des aides financières et subventions pouvant être allouées par l'État à une opération dans un contexte de rénovation thermique et sous contrainte de garantie de performance énergétique. Le montant des aides publiques et le

périmètre des travaux couverts évoluent très régulièrement, en fonction des orientations budgétaires et des priorités des pouvoirs publics. On peut citer (liste non exhaustive) :

- Le crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE),
- L'éco-prêt à taux zéro/l'Ecoptz collectif,
- Les certificats d'économies d'énergie,
- Le programme « Habiter Mieux » de l'ANAH,
- Le programme d'isolation à un euro pour les ménages modestes.

On admettra dans MACARON que le gestionnaire ne peut prétendre à ces aides, soit qu'elles ne lui sont pas destinées soit que les critères d'obtention ne sont pas rencontrés par les caractéristiques techniques du parc ou de l'organisation. Cette hypothèse fait l'objet d'une discussion sous la forme d'une analyse des conditions de rentabilisation des investissements numergétiques, en chapitre 7.

4(D) **Évolution des outils numériques : MAT**

Courbe d'évolution de la maturité technique et technologique du BIM. On émet l'hypothèse dans MACARON que le BIM n'est pas, à l'heure à laquelle sont réalisés ces travaux, arrivé à maturité technologique totale : pour preuve les nombreux développements dont il fait l'objet en photogrammétrie et en datascience. La variable d'évolution des outils numériques est alors une variable dynamique qui représente le gain de maturité technique des outils et processus BIM au cours du temps. Dans MACARON on rapproche l'évolution de la maturité technologique de BIM à sa courbe d'adoption potentielle (théorie de l'innovation selon Rogers) sous la forme « parts de marché cumulées » (sigmoïde). L'horizon de pleine maturité du BIM fait l'objet d'une analyse de sensibilité en chapitre 7.

5(E) **Coût des travaux de Rénovation**

Cf. page 85.

6(F) **Capacité financière**

La capacité financière d'un acteur ou groupe d'acteurs correspond au montant financier dont il dispose pour les investissements et les dépenses courantes de gestion-exploitation du parc. Sa mesure repose sur la différence, cumulée dans le temps, des flux de trésorerie générés par l'activité de gestion-exploitation soit la différence des recettes et des dépenses d'exploitation.

7(G) **Revenus d'exploitation**

Les revenus d'exploitation correspondent au montant en euros du revenu annuel lié à la perception de loyers d'un bien immobilier locatif. Ils sont le résultat du produit de la valeur locative (voir ci-dessus) applicable au parc et de la surface louée. Dans MACARON, les revenus d'exploitation sont les seules recettes générées par l'exploitation du parc. Cela signifie qu'avec les seuls produits locatifs générés sur le parc, le gestionnaire doit être en mesure d'assurer non seulement les dépenses courantes d'exploitation et de fonctionnement du parc et de l'organisation, mais aussi les investissements numergétiques à produire sur les bâtiments. Ainsi la teneur des revenus d'exploitation représente-t-elle une forte contrainte économique pour le gestionnaire dont l'objectif est, dès lors, de maximiser ses revenus pour maintenir son activité et assurer la faisabilité financière des investissements ponctuels. Dans MACARON, le gestionnaire n'a qu'une solution pour maximiser ses revenus : maximiser l'occupation du parc. Cette hypothèse sera approchée de différentes manières en chapitre 7, par l'analyse de la sensibilité du modèle à la valeur locative et à la prise en compte de la valeur de verte notamment.

8(H) **Dépenses de maintenance**

Cf. page 86.

9(I) **Taux d'occupation/d'usage**

Cf. page 86.

10(J) **Classe énergétique**

Cf. page 85.

11(K) **Coûts exploitation, gestion, Ressources Humaines**

Les coûts d'exploitation désignent l'ensemble des charges et frais supportés par le gestionnaire lors du processus de production du service de gestion-location immobilière. Les principales charges d'exploitation sont dans MACARON les frais de personnel, les frais de gestion du système d'information et les autres frais de gestion administrative du parc.

12(L) **Qualité des travaux de Maintenance & Rénovation**

Cf page 86.

13(M) **Valeur verte**

Extrait de (DINAMIC, 2015) : la valeur verte est « la valeur nette additionnelle d'un bien immobilier dégagée grâce à

une meilleure performance environnementale (cette performance environnementale pouvant être liée à différents déterminants : la performance énergétique, mais également l'accès aux transports en commun, l'utilisation d'énergies renouvelables, les matériaux de construction utilisés, l'attribution d'un label de performance environnementale, etc.). La plupart des acteurs se limitent toutefois à la dimension énergie. Dans le cadre de cette étude, la valeur verte est définie comme l'augmentation de la valeur engendrée par la meilleure performance énergétique et environnementale d'un bien immobilier par rapport à un autre, toutes leurs caractéristiques étant égales par ailleurs. Elle est exprimée en termes de «valeur vénale». La performance énergétique et environnementale est mesurée par le seul diagnostic de performance énergétique (DPE). » La valeur verte fait l'objet d'une analyse de sensibilité du modèle en chapitre 7. Nos hypothèses de modélisation sont présentées en annexe 1.

14(N) Coûts Acquisition-Traitement-Maintenance des données et du Système d'Information

Les coûts d'Acquisition, de Traitement et de Maintenance (ATM) des données techniques du parc et d'entretien du Système d'Information (SI). On y inclut les coûts associés à la numérisation des données du parc, à la modélisation des jumeaux numériques BIM et à leur mise à jour, et les coûts d'investissement et de maintenance du système d'information BIM. On supposera dans ces travaux que les coûts relatifs à la gestion des données BIM ne sont variables qu'en fonction du niveau de numérisation du parc choisi par le gestionnaire, ce qui nous amène à nous affranchir des variations de prix liées aux techniques d'acquisition et de traitement des informations pourtant pertinentes à cet endroit (Gimenez et al., 2016; Lee et al., 2012). Nos hypothèses de modélisation et de quantification des coûts ATM et SI sont disponibles respectivement en annexe 2 et annexe 3.

15(O) Postes d'économies BIM

L'ouvrage de (Celnik et al., 2015), les publications de (Barlish and Sullivan, 2012), (Bougrain, 2018) etc font état de plusieurs postes d'économies potentielles sur les charges d'exploitation-maintenance d'un bâtiment liés à l'utilisation du BIM. Cette variable nous permettra de représenter un certain nombre des hypothèses mentionnées dans cette littérature concernant l'évolution des dépenses du gestionnaire suite à l'adoption du BIM.

2.2.4. Module Ressources Humaines (RH)

Ci-dessous est détaillée la nomenclature de la matrice associée au module RH.

1(A) Évolution des outils numériques : MAT

Cf. page 87.

2(B) Ressources informationnelles du Système d'Information

Cette variable traduit le degré de connaissance du parc par le gestionnaire. Elle mesure l'évolution de la densité informationnelle³¹ du système d'information (ici, la maquette numérique BIM du bâtiment) au cours du temps, au regard de la qualité et de la précision de l'information dont dispose le gestionnaire sur l'état de son parc à un instant donné. On admet en effet que la création de connaissance est intimement liée à la disponibilité de l'information, elle-même subordonnée d'une part à la capacité du SI à donner accès à l'information recherchée, d'autre part à la qualité des données qui la compose (Beers et al., 2006; Machlup et al., 1993; Moinet, 2009; Vicente, 2003). Les données sont considérées dans ces travaux comme des ressources, au même titre que les ressources financières et humaines, dont dispose le gestionnaire pour assurer ses missions de gestion patrimoniale. Une de nos hypothèses ici est que meilleure est la connaissance technique du parc, plus les choix techniques de conception-construction sont éclairés de cette connaissance et favorisent la performance énergétique du parc. Des données à jour et précises, résultant d'un suivi attentif des bâtiments et des modèles numériques, engendrent des ressources informationnelles fiables qui permettent au gestionnaire de prendre des décisions rapides pour des interventions correctement dimensionnées. La sensibilité du modèle à la quantité/qualité des contenus de données qui constituent les ressources informationnelles du gestionnaire sera évaluée en chapitre 7 (analyses de sensibilité SC2 et suivants).

Pour (Thorel, 2014), la qualité d'une information est à rapprocher de l'imperfection des données qui la composent. Cette imperfection se caractérise par l'imprécision, l'incomplétude ou l'inexactitude desdites données. Notre hypothèse est que la qualité des ressources informationnelles et de l'exploitation des données techniques du parc dont elle découle sont critiques dans le processus de création de connaissances au sein de l'organisation. Or MACARON considère la connaissance du parc comme vecteur de performance de la stratégie énergétique du gestionnaire, ce qui conduit à faire de la qualité des données un élément central de notre modèle.

3(C) Coûts exploitation, gestion, Ressources Humaines

Cf. page 87.

4(D) Expérience et qualification BIM de la Ressource Humaine

Un des freins à l'adoption du BIM souvent mentionnés dans la littérature ci-avant évoquée fait référence au digital gap décrit spécifiquement par (de Lange et al., 2017) : le manque de compétences numériques réelles des acteurs de la construction rend difficile leur appréhension et leur maîtrise du BIM. On suppose dès lors que la formation des

³¹ La notion de densité informationnelle peut être rapprochée de notre variable d'intensité de numérisation : le volume de données contenu dans un modèle numérique BIM.

effectifs à la compétence BIM et l'expérience que les opérateurs (la workforce) développent ensuite au contact de ces outils ont un impact sur la productivité globale des processus du détenteur du BIM, ici le gestionnaire, et donc sur la qualité de ses services. Cet élément est dans MACARON le reflet de la stratégie de formation des effectifs (et potentiellement de recrutement, voir chapitre 8) engagée par le gestionnaire.

5(E) **Workforce (composition des Ressources Humaines)**

Ensemble des ressources humaines disponibles au sein de l'organisation pour assurer l'activité de gestion de patrimoine. La workforce se compose de différents types de profils d'effectifs (détail en chapitre 5 MERH).

6(F) **Workflows (flux de travail)**

Désignent les flux de travail associés à la maintenance et à la rénovation des bâtiments du parc. Ils sont représentés dans MACARON par un montant annuel d'heures à réaliser sur le parc pour la réalisation de ces différents types de missions qui constituent partiellement l'activité de gestion patrimoniale.

7(G) **Formations à la compétence BIM**

Les formations BIM servent l'acquisition et le perfectionnement de la qualification professionnelle BIM des effectifs. La mise en œuvre des formations BIM est considérée dans MACARON comme un élément à part entière de la stratégie BIM du décideur. L'expérience BIM, au contraire de la qualification BIM, peut être acquise par la seule mise en œuvre des processus et des outils, et ne requiert pas la formation des opérateurs. La sensibilité du modèle à la formation des effectifs fait l'objet d'une analyse de sensibilité en chapitre 7.

8(H) **Qualité des travaux de Maintenance & Rénovation**

Cf. page 86.

2.2.5. Module Déploiement Numérique (DN)

Ci-dessous est détaillée la nomenclature de la matrice associée au module DN.

1(A) **Évolution des outils numériques : MAT**

Cf. page 87.

2(B) **Expérience et qualification BIM de la Ressource Humaine**

Cf. plus haut.

3(C) **Formations à la compétence BIM**

Cf. plus haut.

4(D) **Qualité des travaux de Maintenance & Rénovation**

Cf. page 86.

5(E) **Workflows (flux de travail)**

Cf. plus haut.

6(F) **Coûts Acquisition-Traitement-Maintenance des données et du Système d'Information**

Cf. page 88.

7(G) **Intensité des travaux de numérisation : LOD**

La numérisation est la conversion d'un objet réel, ici le bâtiment, en un objet numérique, exploitable par un système informatique. L'objet technique bâtiment, et *a fortiori* l'objet technique parc de bâtiments, peut contenir un nombre très élevé de données à numériser, en fonction du contenu informatif attendu. Ces données font l'objet de classifications (voir chapitre 1) qui mettent en lumière l'architecture globale et la structure des informations contenues dans l'objet numérique. Dans MACARON, on utilise la notion de LOD³² (Level of Development, voir chapitre 1) pour discrétiser et quantifier ces différents niveaux de contenus informatifs et les associer à ce que nous avons appelé ici une intensité des travaux de numérisation des bâtiments du parc. Nos travaux s'appuient sur la définition de six niveaux de contenus : de LOD0 (sans BIM) à LOD5 (jumeau numérique). La variable introduite ici représente le choix stratégique d'un de ces niveaux de numérisation par le gestionnaire. On interroge ici la capacité du gestionnaire à rationaliser l'acquisition et le traitement des ressources informationnelles en fonction de ces contenus de données. Nos hypothèses de modélisation et de quantification des LOD sont détaillées en annexe 2.

³² Dans la suite de ces travaux et pour éviter toute confusion avec des variables dynamiques, on abandonnera l'appellation LODt au profit de celle de LOD.

8(H) **Date de mise en œuvre : T0**

Date à laquelle est effectué le premier investissement pour la rénovation du système d'information, soit dans MACARON pour l'adoption du BIM. La mutation du système d'information d'une organisation peut prendre plusieurs formes et être plus ou moins progressive selon la stratégie du décideur, comme le soutient (Cluzel, 2006). Dans MACARON on retient pour l'adoption du BIM une stratégie de basculement direct : cette stratégie réalise « le basculement d'un système d'information à un autre sans superposition de tout ou partie de l'un des deux systèmes sur l'autre. La fin du premier engendre le début du second. » Dans cette hypothèse, on suppose en effet que la date de déploiement du BIM en interne est un paramètre hautement stratégique, *a fortiori* en considération de l'évolution au cours du temps des caractéristiques techniques et technologiques du BIM (MAT) qui peut modifier l'intérêt, la cohérence et la rentabilité des investissements déployés pour le système d'information BIM.

9(I) **Ressources informationnelles du Système d'Information**

Cf. page 88.

10(J) **Adéquation contenus de données aux activités**

Selon (Celnik et al., 2015) les contenus de données, pour être utiles aux missions d'exploitation (maintenance, rénovation, gestion) du parc, doivent s'aligner avec les missions et activités précises de l'organisation : « Pour être utile à une prise de décision éclairée dans les opérations de rénovation ou de maintenance, cette connaissance doit correspondre à un niveau de détail compatible BIM. » Ceci laisse supposer les conséquences potentielles d'un désalignement entre contenus de données et activités de l'organisation, sans en expliciter ni la teneur ni l'ampleur. C'est l'objectif de cet élément, à travers lequel on caractérise le lien entre densité informationnelle du système d'information (ici, la maquette numérique BIM du bâtiment) et support aux activités de gestion de patrimoine. L'annexe 2 détaille nos hypothèses de modélisation à ce sujet.

11(K) **Dataflows (flux de données)**

Désignent les flux de données qui transitent au sein de l'organisation et la façon dont le système d'information est alimenté par les volumes de données mobilisés par l'activité de gestion du parc. Les dataflows formalisés dans MACARON représentent les processus de collecte de données éventuellement d'origines externes (IoT, sous-traitants, partenaires, etc.) et de traitement. Les données collectées et traitées construisent la ressource informationnelle dont dispose le gestionnaire pour la gestion de parc. Comme les autres ressources dans MACARON, la disponibilité des ressources informationnelles dépend de la qualité des processus de gestion de données (acquisition, traitement et maintenance ATM). En cela on émet l'hypothèse ici que la modification des dataflows à l'adoption du BIM possède une influence indirecte sur la performance globale de l'organisation et des travaux qu'elle engage.

3. Synthèse du chapitre 3 : démarche de structuration du SORON

Dans le présent chapitre 3, nous avons présenté la méthodologie mise en œuvre dans notre représentation conceptuelle du SORON (Système Objet de la Rénovation Orientée Numérique). À travers le découpage systémique et les analyses structurelle et fonctionnelle du système, la démarche employée nous a permis de borner nos travaux de recherche à la modélisation de quatre modules thématiques organisés autour de quatre échelles structurelles. Les niveaux structurels de MACARON (Modèle d'Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique) sont assimilables à quatre échelles de décision/action pour la transition numérique : le niveau NANO, destiné à incarner les comportements individuels des usagers occupants ; le niveau MICRO qui représente dans ces travaux l'objet technique bâtiment, et par extension l'objet technique parc de bâtiments homogène de type résidentiel collectif ; le niveau MESO représente l'organisation du gestionnaire de patrimoine, un décideur unique avec ses enjeux propres pour la gestion exploitation du parc privé ; le niveau MACRO enfin est destiné à représenter l'ensemble urbain constitué d'un stock hétérogènes d'objets techniques (diversification des typologies de bâtiment), et une organisation collaborative et intégratrice de décideurs multiples (publics et privés par exemple, enjeux et objectifs variés). Nous nous sommes approprié les enjeux forts mis en lumière dans les précédents chapitres pour proposer des objectifs de modélisation pour chacun des huit sous-modèles qui sera développé dans les prochains chapitres (synthèse en Table 12 page suivante).

Table 12. Synthèse des modules, niveaux et sous-modèles de MACARON

		Modules thématiques			
		PE Performance énergétique Stratégie énergétique sur un ensemble de bâtiments	CF Capacité Financière Gestion financière de l'organisation et du parc de bâtiments	RH Ressources Humaines Organisation du travail et contrainte de capacité humaine	DN Déploiement Numérique Stratégie numérique et mutation du système d'information du parc
Niveaux structurels	MICRO L'objet technique	MIPE Évaluation de la performance énergétique du parc	MICF Contrainte de rentabilité de l'activité de gestion- exploitation du parc	MIRH Réalisation des flux de travail opérationnels pour la rénovation du parc	MIDN Réalisation des flux de travail opérationnels pour la numérisation du parc et la gestion des données
	MESO L'organisation	MEPE Contrainte/objectifs réglementaires de rénovation	MECF Contrainte de disponibilité des ressources financières	MERH Contrainte de disponibilité et de compétence des ressources humaines	MEDN Évaluation de la disponibilité et de la qualité des ressources informationnelles

Nous avons ensuite pu identifier, avec le concours des experts du CSTB, les éléments de notre système complexe et en structurer les interactions fondamentales par une approche matricielle. Les chapitre 4 et chapitre 5 qui suivent présentent respectivement les développements des niveaux MICRO et MESO. Chaque niveau MI et ME y sera analysé selon une architecture organisée autour des modules thématiques, qui rend compte du processus de modélisation employé.

Ainsi une première partie intitulée *Description détaillée du niveau [MICRO/MESO]* rappellera les causalités identifiées entre les sous-modèles du niveau concerné, ainsi que l'objectif de modélisation (finalité du système) poursuivi pour ce niveau.

Puis dans l'ordre des modules thématiques PE, CF, RH et DN, les sections suivantes introduiront tout d'abord le *Diagramme causal synthétique* du sous-modèle concerné. Y seront abordées les hypothèses fondamentales sur lesquelles il repose ainsi que les principales relations causales qui le composent.

Ensuite dans la sous-section *Diagramme de flux*, nous développerons notre réflexion quant aux relations identifiées dans le diagramme causal, de sorte à retranscrire le plus fidèlement possible les étapes de représentation graphique et de quantification du modèle.

Pour finir, une *Synthèse* clora chaque chapitre afin de mettre en lumière les principales conclusions tirées des phases de modélisation causale et quantitative.

MACARON contient un certain nombre de variables d'indexation, lesquelles sont invisibles dans les diagrammes. Nous nous sommes toutefois efforcés de nommer les éléments du modèle de telle sorte que l'indexation utilisée puisse être retracée par le lecteur : la Table 13 présente la nomenclature de ces indices. Aussi pourrions-nous suggérer au lecteur de se munir d'une impression de la présente page.

Table 13. Nomenclature des indices du modèle.

Nomenclature des indices	
<i>b</i>	l'indice de b âtiment ($b=1$ à $b=15$)
<i>e</i>	les types d' e ffectifs qui composent les équipes de travail : M les M anagers, T les T echniciens et S les S upports
<i>ec</i>	l'indice de classe énergétique (e nergy c lass) ($ec=1$ à $ec=7$, classes A à G)
<i>en</i>	le type d' é nergie : <i>électricité</i> , <i>gaz</i> , <i>électricité verte (renouvelable)</i>
<i>i</i>	l'année de démarrage de la simulation ($t=0$)
<i>m</i>	la m ission concernée par les flux de travail : M pour la M aintenance des bâtiments, R pour la R énovation des bâtiments, MC , MM et MR respectivement pour la C onstruction, la M aintenance et la R énovation des M odèles de données BIM
<i>p</i>	la p hase concernée par les flux de travail : W pour les travaux, DM pour les études et gestion de données.
<i>t</i>	l'année de simulation courante ($t=0$: 2018 à $t=32$: 2050)

CHAPITRE 4

DEVELOPPEMENT DU MODELE MACARON : NIVEAU MICRO

« Ideas are easy.
Execution is everything. »
John Doerr

1. DESCRIPTION DETAILLEE DU NIVEAU MICRO	95
1.1. RAPPEL DES OBJECTIFS DE MODELISATION DU NIVEAU MI	95
1.2. PARAMETRES DE CONFIGURATION DU NIVEAU OPERATIONNEL	97
2. MIPE – PERFORMANCE ÉNERGETIQUE	98
2.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MIPE)	98
2.2. DIAGRAMME DE FLUX (MIPE)	100
2.2.1. Consommations énergétiques : énergie primaire	101
2.2.2. Facture énergétique : énergie finale	102
3. MICF – CAPACITE FINANCIERE	104
3.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MICF)	104
3.2. DIAGRAMME DE FLUX (MICF)	105
3.2.1. Capacité financière	106
3.2.2. Revenus locatifs	106
3.2.3. Dépenses courantes d'entretien-maintenance	107
4. MIDN – DEPLOIEMENT NUMERIQUE	108
4.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MIDN)	108
4.2. DIAGRAMME DE FLUX (MIDN)	109
4.2.1. Processus opérationnel de gestion de données	110
4.2.2. Évolution des temps improductifs en gestion de données	112
5. MIRH – RESSOURCES HUMAINES	115
5.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MIRH)	115
5.2. DIAGRAMME DE FLUX (MIRH)	115
5.2.1. Processus opérationnel de rénovation	117
5.2.2. Évaluation de la qualité technique de travaux	119
6. SYNTHESE DU CHAPITRE 4 : FONDAMENTAUX DE LA SPHERE OPERATIONNELLE	120

Le précédent chapitre mettait en évidence la structure fonctionnelle de MACARON (Modèle d'Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique) ainsi que les objectifs de modélisation propres à chacun des sous-modèles qui composent le SORON (Système Objet de la Rénovation Orientée Numérique). Ce chapitre est dédié à la présentation de notre démarche de modélisation qualitative et quantitative du niveau MICRO : l'objet technique bâtiment et les processus opérationnels qui s'y rattachent.

1. Description détaillée du Niveau MICRO

1.1. Rappel des objectifs de modélisation du niveau MI

Le niveau MICRO représente l'objet technique à rénover : un parc locatif de bâtiments résidentiels collectifs gouverné par un décideur unique - le gestionnaire de patrimoine immobilier - dont l'organisation fait l'objet du niveau MESO au chapitre suivant. La fonction globale de cette échelle spatiale est de caractériser l'état des bâtiments au cours de leur phase d'exploitation. Pourra ainsi être mesurée et évaluée l'évolution des performances énergétique et économique du parc locatif soumis à diverses politiques de maintenance, de rénovation et de numérisation.

Le niveau MICRO produit des informations sur le parc et les diffuse au système décisionnel au niveau MESO. Le système décisionnel, sur la base de ces informations, recherche l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments à travers le déclenchement des opérations de maintenance et de rénovation, et la gestion des ressources qui s'y rattachent.

Le niveau MICRO est principalement soumis, en termes de perturbations, à l'évolution des politiques publiques de rénovation et à celle de la stratégie numergétique interne du gestionnaire. Dans ce contexte, ce niveau permet d'étudier la création de valeur sur le parc par la balance entre les dépenses de maintenance courante et les revenus locatifs. Ceux-ci étant déterminés de manière exogène par les dynamiques du marché immobilier (intrants), le modèle MICRO vise à minimiser les dépenses opérationnelles et maximiser l'occupation des bâtiments pour générer un profit sur le parc. Sans une telle optimisation financière, la capacité financière de l'organisation pourrait ne pas autoriser d'éventuels travaux de numergétisation. La Figure 27 ci-après présente le diagramme résultant de la phase de modélisation causale du niveau MICRO. Y sont représentées les interactions entre les différents sous-modèles :

- MIPE : évaluation de la performance énergétique des bâtiments, et impact sur l'attractivité ;
- MIRH : processus opérationnel des travaux de rénovation et impact sur la qualité des travaux ;
- MIDN : processus opérationnel de gestion des données et impact sur la fiabilité de l'information ;
- MICE : gestion des ressources financières via l'activité de gestion locative et patrimoniale.

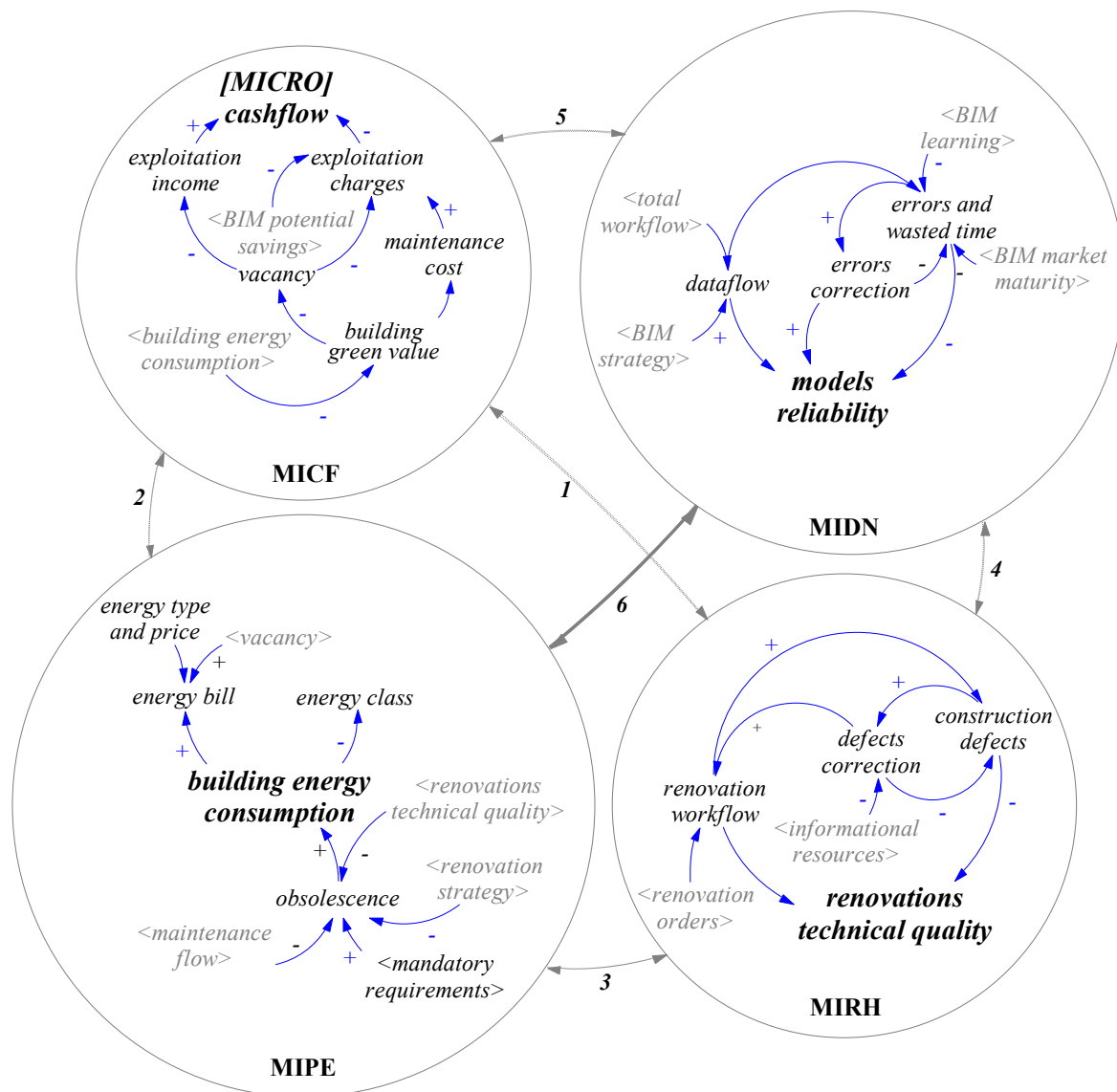


Figure 27. Diagramme causal du niveau MICRO

Ci-après sont introduites nos hypothèses de modélisation des interactions (1 à 5) représentées en Figure 27. Le lien (6) n'existe pas sous forme de relation directe dans le modèle : c'est notre objet d'étude.

[MI] RH↔CF (1)

La disponibilité des ressources financières conditionne la faisabilité des opérations requises ou demandées : plus les flux de travail requis sont importants, plus la contrainte financière est forte, pouvant entraîner des retards dans les opérations.

[MI] CF↔PE (2)

Les interactions entre CF et PE sont multiples. Valeur verte et inoccupation des bâtiments, calculées en CF, impactent à la fois la consommation d'énergie et le revenu, limitant ainsi le financement des activités d'entretien des bâtiments. L'ordre de priorité des demandes de rénovation dépend des charges énergétiques : plus les gains attendus sur la facture énergétique sont élevés, plus l'opération demandée est acceptée rapidement (dans MESO). En outre, les revenus locatifs participent à la capacité d'investissement du gestionnaire en matière de travaux.

[MI] PE↔RH (3)

La complexité des processus RH et la dégradation des compétences internes engendrent une non-qualité, synonyme de perte de performance énergétique. Des scénarios de rénovation et de

maintenance axés sur l'efficacité énergétique accroissent la complexité des travaux et donc la nécessité de ressources informationnelles et humaines pour la conduite des opérations. En outre, cette complexité des travaux génère des défauts de conception et de mise en œuvre impactant la dynamique globale de qualité des travaux et d'obsolescence des bâtiments, impliquant des reprises et une sous-traitance.

[MI] RH↔DN (4)

Les interactions entre MIRH et MIDN modélisent les contraintes de gestion des données. Obsolescence des compétences et tendances externes conduisent à des erreurs et pertes de temps qui pénalisent l'ensemble du système. Hypothèse est fait que le BIM permet de résorber la non-qualité, en décomplexifiant les processus et en assurant la collaboration et la centralisation/standardisation des données.

[MI] DN↔CF (5)

Il s'agit ici d'assurer le financement du processus de numérisation. Une stratégie ambitieuse générera des gains aussi bien que des dépenses significatives. La modélisation des objets techniques et l'ensemble de la chaîne de traitement des données sont consommateurs de temps et d'argent. La numérisation n'est effectuée que si la faisabilité financière est assurée.

1.2. Paramètres de configuration du niveau opérationnel

Ce niveau s'intéresse à l'échelle opérationnelle et à la manière dont celle-ci est affectée par les décisions stratégiques et l'environnement réglementaire et technologique décrits au niveau MESO. Notre échelle opérationnelle concerne les processus de rénovation, de traitement de données, de gestion locative et d'exploitation-maintenance. On y évalue l'efficacité d'une stratégie numergétique à travers le gain de performance énergétique de l'objet technique au regard d'une situation de référence³³. C'est aussi dans la sphère opérationnelle que sont modélisées les caractéristiques techniques de notre cas d'étude. Les paramètres retenus pour caractériser le parc qui sera l'objet des opérations de rénovation/numérisation sont discutés aux chapitres 6 et 8. Les scénarios de politique numergétique appliqués sur le parc et les résultats de l'étude de sensibilité de MACARON à ces paramètres seront détaillés aux chapitres 6 et 7.

PP : caractérisation de la performance énergétique initiale de l'objet technique de référence

La mesure de l'état du système requiert un comportement type auquel le confronter. Les hypothèses qui construisent le profil de parc initial, en termes de taille, de distribution et de performance, représentent une première réalité complexe de la variété des parcs. Ces hypothèses conditionnent le comportement à moyen-terme du parc soumis à rénovation et l'efficacité de la stratégie numergétique associée. Cette question prendra tout son sens à l'échelle de la ville (niveau MACRO) où l'hétérogénéité du parc complexifie considérablement le processus de décision (cf. chapitre 8).

VV : impact de la valeur verte sur le marché immobilier

L'étude (DINAMIC, 2015) de l'Association des Notaires de France montre une évolution récente des prix pratiqués sur les marchés immobiliers, en relation avec la mesure réglementaire contraignant les ventes immobilières à la production d'un audit énergétique préalable. Une étiquette énergétique au-dessus (respectivement au-dessous) de la moyenne (classe D) augmente (respectivement diminue) la valeur à la vente des biens correspondants. Il s'agit ici d'une variable externe, qui n'est ni une décision ni une politique publique. C'est une tendance observable, qui pourra ultérieurement être en relation avec le niveau NANO (cf. chapitre 8). Elle est une représentation possible de la « prise de conscience collective de la question environnementale » et de son impact sur le marché de l'immobilier. Elle agit en MICF où son impact sur l'attractivité des bâtiments se traduit par une variation du taux d'occupation du parc.

³³ La situation de référence décrit l'évolution de l'état du système dans un scénario passif, ne mettant en œuvre ni rénovation ni numérisation du parc. Le scénario de référence et les scénarios d'exploitation du modèle sont présentés au chapitre 6.

VL : contrainte de marché sur la création de ressources financières

La gestion locative est l'activité principale de notre gestionnaire décideur et sa seule source de revenus dans notre modèle. On s'intéresse à la fourchette de prix locatifs à échelle nationale et on s'interroge sur la contrainte financière qu'elle exerce dans la mesure où nos prix de tâches ne sont pas dépendants, eux, de la localisation. Elle introduit la notion de tension immobilière, dynamique propre à la ville et cruciale notamment pour des questions d'emploi qui pourront ultérieurement être abordées avec le BIM. La VL ne s'aligne ni avec les coûts de maintenance (variations de prix liées à la complexité de l'ouvrage et non à sa localisation) ni avec les coûts de rénovation (variations de prix liées à l'intensité et à la nature des travaux de rénovation et non à sa localisation). Il s'agit donc là aussi d'une variable externe (considérée constante) participant à la définition du contexte des simulations.

SC0 : caractérisation des processus en situation de référence, sans BIM ni rénovation

Ce scénario primitif, fait d'hypothèses flexibles et ajustables, constitue notre représentation de la situation de référence et donc un socle pour l'analyse des résultats. Il servira d'étalon pour mesurer l'impact des stratégies numergétiques qui s'exprimera à travers tout le réseau de relations indirectes tissées entre la transition numérique (sous-modèles DN) et la transition énergétique (sous-modèles PE). Cela concerne typiquement le processus de rénovation et les taux d'erreur appliqués en MIRH, ou encore les hypothèses relatives à l'efficacité de la maintenance (bâtiment, données) considérée comme parfaite en MIPE et MIDN.

2. MIPE – Performance Énergétique

2.1. Diagramme causal synthétique (MIPE)

L'analyse systémique du sous-modèle MIPE présentée au chapitre 3 nous a permis d'établir les objectifs de modélisation suivants :

- Représenter la dynamique de renforcement des exigences nationales et de la stratégie de rénovation du décideur en matière de performance énergétique (contrainte de performance respectivement externe et interne au modèle) ;
- Identifier les bâtiments du parc qui ne respectent pas ce niveau d'exigence (fonction détecteur) et produire pour le niveau ME l'information sur la performance énergétique des bâtiments du parc (fonction informateur) ;
- Représenter l'impact des travaux de maintenance et de rénovation, dont l'intensité et le niveau de qualité sont le résultat du processus décisionnel pour le premier, du processus opérationnel pour le second.

Ce sous-modèle doit nous permettre dans la phase d'exploitation de ces travaux d'évaluer l'efficacité et la performance de différentes stratégies d'investissements numergétiques à travers la mesure des consommations énergétiques évitées.

La variable d'état retenue dans ce but est la consommation énergétique annuelle par m² de surface unitaire d'objet technique exprimée en kWhép/(m².an) (comparable à un audit de type DPE).

Ramenée au taux d'occupation du bâtiment, elle permet de calculer les consommations cumulées en énergies primaire et finale et la facture énergétique qui en découle, utile au processus décisionnel en ME dans la priorisation des rénovations à réaliser. La Figure 28 page suivante présente notre diagramme causal synthétique du sous-modèle MIPE.

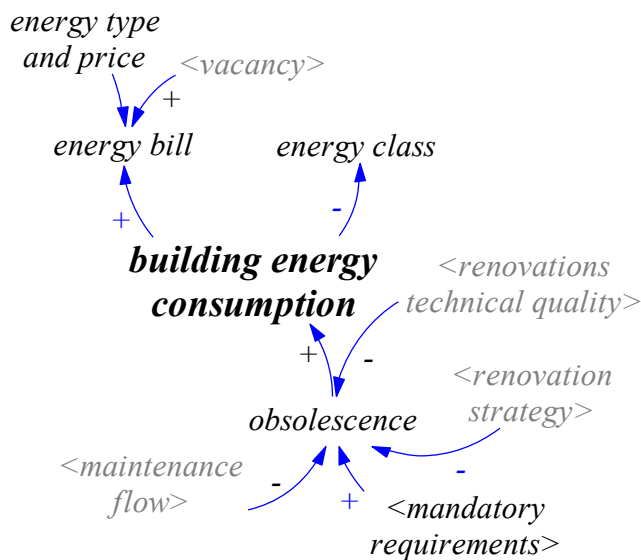


Figure 28. Diagramme causal MIPE.

La performance énergétique des objets techniques est par ailleurs représentée dans le modèle sous la forme d'un indicateur de classe énergétique. Celui-ci constitue dans ce sous-modèle un levier d'attractivité du bâtiment, lequel s'exprime par répercussion de la valeur verte du bien. Il est représenté par le lien causal entre la classe énergétique d'un bâtiment et son taux de vacance dans la Figure 28.

Il est à noter que le gestionnaire, s'il est responsable des travaux de maintenance et de rénovation, n'a pas la charge de la facture énergétique, laquelle incombe aux occupants. Puisque le gestionnaire n'a donc pas d'intérêt direct dans MACARON à voir diminuer le montant de la facture énergétique, on peut d'ores et déjà admettre que celle-ci ne peut constituer en l'état un levier d'incitation à la rénovation. Ce constat fait partie des raisons qui ont motivé la modélisation de la valeur verte et de son impact sur les revenus du gestionnaire. Rappelons à toutes fins utiles que l'exercice du bailleur immobilier repose en grande partie sur la maximisation de ses revenus locatifs. Notre traduction de la valeur verte présentée dans (DINAMIC, 2015) sous forme de coefficient d'attractivité incarne l'intérêt du gestionnaire à améliorer de la performance énergétique des logements dont il a la charge si cela lui permet d'y assurer un taux d'occupation satisfaisant. Là où la facture énergétique ne permettait pas de recréer une telle boucle causale, la valeur verte nous a permis d'introduire dans le modèle l'enjeu économique de maximisation des gains énergétiques pour le gestionnaire.

Une telle relation amène en revanche un biais dans l'analyse des résultats puisqu'une facture énergétique diminuée n'est pas nécessairement le signe d'une performance énergétique améliorée. Il faudra donc tenir compte de ce phénomène à la lecture des résultats d'exploitation du modèle. De plus, si des charges énergétiques élevées ont un impact (fortement) négatif sur l'attractivité d'un logement ou d'un bien immobilier, il est néanmoins fréquent que le besoin de se loger prenne le pas sur la conscience écologique de l'occupant, comme cela se produit souvent en zones immobilières tendues.

Nous avons identifié en chapitre 3 que la perte de performance énergétique pouvait être rapprochée des dynamiques d'obsolescence du bâtiment : son obsolescence fonctionnelle, sa vétusté, et son obsolescence technique et technologique qui en traduit le caractère désuet, notamment au regard des attentes individuelles ou collectives. Ces deux types d'obsolescence sont résorbés par les actions correctrices que sont les opérations de maintenance et de rénovation effectuées sur le parc. L'obsolescence fonctionnelle, qui se caractérise par la dégradation progressive des matériaux et composants, est traitée ici sous l'angle de la non-qualité des travaux opérés sur l'objet technique (lien de causalité entre les variables de qualité technique des travaux et la variable d'obsolescence). Nous admettons en effet, sur la base des éléments présentés ci-avant, que le choix éclairé ou non des matériaux, des systèmes, ainsi que la qualité de leur mise en œuvre, alimentent les dynamiques de gain ou de perte de performance énergétique d'un bâtiment. La bibliographie présentée en chapitre 3 nous permet d'émettre ici l'hypothèse que la qualité technique des travaux de rénovation et de maintenance affecte non-seulement le niveau de performance atteint par les travaux, mais peut aussi

considérablement augmenter le rythme de dégradation de la performance énergétique (Aïssani et al., 2016; Alencastro et al., 2018).

L'obsolescence technique ou technologique quant à elle résulte non pas de la dégradation de l'état d'un bien, mais de l'évolution de la perception qui en est fait. À état constant, tout objet devient obsolète lorsqu'il ne remplit plus un certain niveau d'exigence, le devient de plus en plus à mesure que les attentes se renforcent et d'autant plus souvent que ces attentes évoluent à un rythme soutenu.

La variable d'obsolescence est donc à la fois le reflet du renforcement des exigences du gestionnaire décideur et de l'autorité publique en matière d'énergie, et de la non-qualité des processus opérationnels dans la mise en œuvre des travaux.

La formulation par le modèle des demandes de rénovation à travers le parc relève ensuite de la confrontation de la performance énergétique de l'objet technique ainsi dépréciée aux exigences du décideur (lesquelles ne peuvent être inférieures à celles des politiques publiques).

2.2. Diagramme de flux (MIPE)

Pour rappel, le module MIPE a une fonction principale de détecteur. Il génère une demande de rénovation pour les bâtiments du parc non-conformes aux objectifs de la politique énergétique du décideur. À cette fin, le modèle confronte au pas de temps la classe énergétique de chaque bâtiment du parc $E_{cons}/m^2(b,t)$ à celle préconisée par le système décisionnel dans sa *stratégie de rénovation* (RT^{34}), reproduisant le processus d'un audit énergétique annuel. Suivant le processus détaillé ci-avant, MIPE produit :

- La formulation de requêtes de travaux de rénovation $Rrequest(b,t)$,
- Un élément décisionnel de priorisation des opérations (en MEPE) : la facture énergétique $Ebill kWh_{ef}(b,t)$.

La Figure 29 ci-dessous présente notre traduction en diagramme de flux des causalités explicitées précédemment et la Table 14 en page suivante la nomenclature des éléments correspondants.

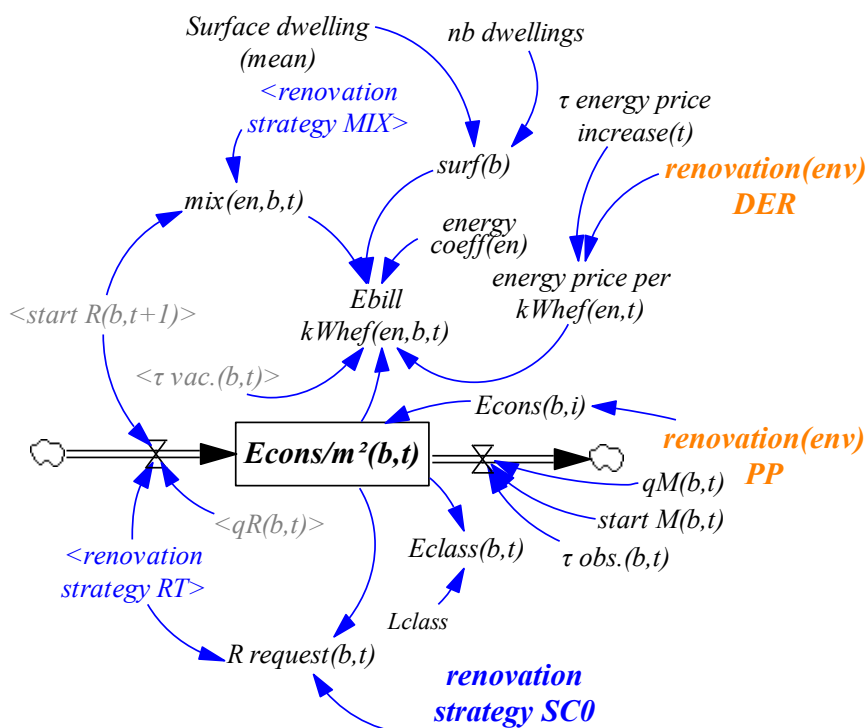


Figure 29. Diagramme de flux MIPE.

³⁴ Les configurations de RT sont détaillées au chapitre 6.

Table 14. Nomenclature du diagramme de flux MIPE.

$Econs/m^2(b,t)$	Consommation annuelle d'énergie primaire du bâtiment b à l'instant t, $Econs(b,i)$ étant la consommation d'énergie annuelle initiale du bâtiment b à l'instant $t=0$ (voir ci-dessous). Chaque fois qu'une rénovation est déclenchée pour un bâtiment b au temps t par $start\ R(b, t+1)$, $Econs(b,t)$ calcule la nouvelle consommation énergétique du bâtiment sur la base des objectifs visés par la stratégie de rénovation RT (consommation d'énergie primaire annuelle, cible de performance énergétique du bâtiment b au temps après rénovation (cf. chapitre 6). Le niveau de performance visé est relativisé par $qR(b,t)$, le coefficient de qualité technique des travaux de rénovation pour le bâtiment b au moment t décrit ci-dessous.
$Rrequest(b,t)$	Requête de rénovation pour le bâtiment b au temps t. $Rrequest(b,t)$ est de forme logique et prend la valeur (1 ou 0) selon que le bâtiment est considéré conforme aux exigences stratégiques ou non.
$Eclass(b,t)$	Classe énergétique du bâtiment b à l'instant t en fonction de $Econs/m^2(b,t)$. Une notation $Eclass(b,t)$ est affectée à chaque élément b du parc. Chiffree de 1 à 7, elle représente l'équivalent numérique des étiquettes énergétiques A à G sur la base des limites de classe réglementaire des étiquettes énergétiques françaises ($Lclass$), telles que décrites dans la Table 15. La classe énergétique $Eclass(b,t)$ est utile pour déterminer la valeur verte des bâtiments du parc en MICF.
$Ebill\ kWh(b,t)$	Facture énergétique annuelle en énergie finale du bâtiment b au temps t. Son calcul prend en compte les variations de $mix(en,b, t)$ le mix énergétique du bâtiment b au temps t et de $energy\ price/kWh(en,t)$ l'évolution du prix de l'énergie par kWh d'énergie finale et par type d'énergie : voir Éq. 3.
$start\ M(b,t)$	Déclencheur de maintenance annuelle. Dans un cas de maintenance parfaite, on considérera qu'il contrecarre totalement $\tau obs.(b,t)$, la dynamique de croissance du taux d'obsolescence du bâtiment b au temps t.
$Econs(b,i)$	Le modèle est initialisé de telle sorte que chaque bâtiment se voit attribuer en début de simulation une consommation énergétique de départ $Econs(b,i)$. Déterminées selon une loi de distribution présentée au chapitre 6, ces consommations énergétiques initiales reconstituent une cartographie voulue réaliste des consommations du parc à $t=0$.
$qR(b,t)$	$qR(b,t)$ est notre quantification du volume des défauts techniques et des défauts de conception qui sont à l'origine d'une moindre performance effective des travaux. Nous avons vu au chapitre 3 que $qR(b,t)$, en plus d'impacter l'efficacité des travaux, pouvait aussi engendrer une accélération de $\tau obs.(b,t)$, le rythme auquel décroît $Econs/m^2(b,t)$ dans le temps du fait du vieillissement des composants du bâtiment. Cette relation n'est pas tracée dans le diagramme et ne sera pas traitée dans ces travaux mais pourrait aisément faire l'objet de développements ultérieurs.
$Surf(b)$	La surface est calculée sur la base du nombre de logements dans le bâtiment b, de la surface moyenne d'un logement pondérée par $\tau vac.(b, t)$, taux de vacance du bâtiment b à l'instant t. La surface des bâtiments intervient notamment dans le dimensionnement et la distribution du parc. Nos hypothèses de modélisation concernant les surfaces de bâtiment sont présentées et discutées au chapitre 6.
$energy\ price/kWh(en,t)$	L'évolution future du prix de l'énergie. Le caractère incertain de ces dynamiques pour les différents types d'énergie s'exprime à travers la variable d'environnement DER, la dérive du prix de l'énergie finale (cf. chapitre 6).

Table 15. Limites de classes énergétiques réglementaire et codification de $Eclass(b,t)$.

Lclass(ec) [Ø]	Lclass _A		Lclass _B		Lclass _C		Lclass _D		Lclass _E		Lclass _F		Lclass _G	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Econs(b,t) [kWh/m ² .an]	-	50	90	150	230	330	450	-						
Eclass(b,t) [Ø]	1	2	3	4	5	6	7							

2.2.1. Consommations énergétiques : énergie primaire

$Econs/m^2(b,t)$ varie au cours du temps par l'interaction d'un flux entrant et d'un flux sortant. Le premier représente le gain de performance énergétique lié aux opérations de rénovation ; il fait diminuer le niveau du stock. Le second illustre le processus de perte de performance énergétique liée à la vétusté et à la dégradation matérielle des composants $\tau obs.(b,t)$ au cours du temps, s'il celui-ci pas résorbé par des opérations de maintenance de qualité parfaite $qM(b,t)$.

Le calcul au pas de temps t de la consommation en énergie primaire annuelle par m^2 de surface unitaire de bâtiment en $[kWhep/(m^2.an)]$ s'établit comme suit :

Éq. 1

$$Econs/m^2(b,t) = Econs/m^2(b,t-1) \times \left(1 + \left(\tau_{obs.}(b,t) \times (1 - qM(b,t) \times start\ M(b,t))\right)\right) - start\ R(b,t) \times (Econs/m^2(b,t - renovation\ strategy\ RT))$$

Où :

$Econs/m^2(b,t)$	est la consommation énergétique unitaire par m^2 du bâtiment b au pas de temps t , en $kWhep/(m^2.an)$
$renovation\ strategy\ RT$	est la consommation énergétique unitaire par m^2 visée pour le bâtiment b au pas de temps t , en $kWhep/(m^2.an)$
$start\ M(b,t)$	est le déclencheur des opérations de maintenance (0 ou 1)
$\tau_{obs.}(b,t)$	est le taux d'occupation du bâtiment b au pas de temps t [0-1]
$qM(b,t)$	est le niveau de qualité atteint par les travaux de maintenance du bâtiment b au pas de temps t [0-1]

Les demandes de rénovation sont déclenchées ponctuellement et résultent d'un choix stratégique (nous détaillerons ce processus de décision dans le prochain chapitre). La maintenance au contraire est appliquée annuellement de façon périodique et systématique. Dans MACARON, nous avons émis l'hypothèse que l'intensité des opérations de maintenance destinées à assurer un service minimal de l'objet technique bâtiment reste constante sur la durée de la simulation, et qu'elle n'est soumise à aucune contrainte réglementaire spécifique. Ces travaux considèrent par ailleurs un cas de maintenance parfaite c'est-à-dire une assiduité et une qualité des travaux irréprochables ($start\ M(b,t)=1$ et $qM(b,t)=100\%$).

À l'inverse, les opérations de rénovation, soumises à la fois au respect des réglementations thermiques en vigueur et à la trajectoire énergétique du gestionnaire, peuvent donc voir varier leur niveau d'intensité au cours du temps ou selon le bâtiment considéré. On supposera, dans une première approche, que la stratégie de rénovation choisie à l'échelle du parc impose un scénario de rénovation commun à tous les bâtiments. La différenciation des objectifs de rénovation à travers le parc sera abordée au chapitre 8. Les requêtes de rénovation $Rrequest(b,t)$ sont générées pour tous les bâtiments pour lesquels un besoin est identifié sans tenir compte à ce stade d'une quelconque priorisation, ni de la faisabilité financière des opérations ou du rythme annuel maximum qui seront traités au niveau ME par le système décisionnel. $Rrequest(b,t)$ suit une forme logique (Éq. 2).

Éq. 2

$$Rrequest(b,t) = \begin{cases} SI(Econs/m^2(b,t) > renovation\ strategy\ RT) \\ ALORS(Rrequest(b,t) = 1) \\ SINON(Rrequest(b,t) = 0) \end{cases}$$

Où :

$Rrequest(b,t)$	est la requête de rénovation pour le bâtiment au b au pas de temps t (0 ou 1)
$Econs/m^2(b,t)$	est la consommation énergétique unitaire par m^2 du bâtiment b au pas de temps t , en $kWhep/(m^2.an)$
$renovation\ strategy\ RT$	est le plafond maximal de consommations énergétiques en $kWhep/(m^2.an)$ autorisées par le décideur et sa trajectoire énergétique

Dans la configuration SC0, qui représente notre situation de référence (détail au chapitre 6), $Rrequest = 0$: le modèle ne génère aucune demande de rénovation.

2.2.2. Facture énergétique : énergie finale

Le mix énergétique initial des bâtiments est, comme leur consommation initiale $Econs/m^2(b,t)$, défini *a priori* dans le profil du parc (paramètre PP, détail en chapitre 6). On envisage la variable $mix(b,t)$ comme un levier de performance intéressant. En effet si la rénovation du mix énergétique ne modifie pas, dans notre modèle, la consommation $Econs/m^2(b,t)$ atteinte par la rénovation, elle a toutefois un véritable intérêt environnemental dans la décarbonation du parc et sa conversion fossile/renouvelable. La rénovation du mix énergétique n'est pas rendue obligatoire par la réglementation des bâtiments et implique par ailleurs en MECF un surcoût des investissements en rénovation : la décarbonation du

parc est donc considérée ici comme un levier de proactivité de la stratégie énergétique du gestionnaire. Nos hypothèses de modélisation concernant les typologies et la distribution des mix énergétiques dans l'existant résultent d'une analyse de fiches RSET³⁵ issues de la base de données ministérielles OPE³⁶.

Le calcul de la facture énergétique (kWh_{ef}) des bâtiments en [€] au pas de temps t s'établit comme suit :

Éq. 3

$$E_{bill\ kWh_{ef}}(en, b, t) = E_{cons/m^2}(b, t) \times mix(en, b, t) \times surf(b) \div energy\ coeff.(en) \times \tau\ occ.(b, t) \times energy\ price/kWh_{ef}(en, t)$$

Où :

$E_{bill\ kWh_{ef}}(en, b, t)$	est la facture énergétique en kWh _{ef} du bâtiment b au temps t
$E_{cons/m^2}(b, t)$	est la consommation énergétique unitaire par m ² du bâtiment b au pas de temps t
$mix(en, b, t)$	est le mix énergétique du bâtiment b au pas de temps t par type d'énergie en
$surf(b)$	est la surface du bâtiment b
$energy\ coeff.(en)$	est le coefficient de conversion d'énergie primaire en énergie finale propre à chaque type d'énergie tel que...
$\tau\ occ.(b, t)$	est le taux d'occupation du bâtiment b au pas de temps t
$energy\ price/kWh_{ef}(en, t)$	est le coût d'un kWh _{ef} du type d'énergie en au pas de temps t

Enfin le prix des énergies est impacté par le facteur externe de dérive DER. Cet élément représente un schéma d'évolution du prix des énergies qui différencie énergies fossiles et renouvelables. On questionne ici la rentabilité énergétique et la justification économique d'éventuels investissements supplémentaires pour la décarbonation du parc dans une vision « kWh évités ».

Pour les besoins de la modélisation, il nous faut déterminer une estimation des prix (réels) des énergies pratiqués à la date de démarrage de la simulation dans MACARON, puis leur évolution (réaliste) future. La base de données Pégase³⁷ (MTES, 2012) mise à disposition en ligne par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire diffuse publiquement les données statistiques mensuelles et annuelles liées à la tarification (hors inflation et hors actualisation) des énergies en France métropolitaine (Table 16 ci-dessous). La question des coûts de production des différentes énergies - aujourd'hui et à moyen/long-terme - fait l'objet de controverses³⁸ notamment sur le coût réel des énergies renouvelables³⁹. On formule une première hypothèse sur le prix de l'électricité verte, non référencé dans la base de données statistiques ministérielle. On lui attribue un coût/kWh_{ef} inférieur de 25% à celui de l'électricité fossile.

Table 16. Prix des énergies en 2017 en France métropolitaine ;
Source : (MTES, 2012)

	Électricité Tarif base 6kVA	Gaz Tarif B2i	Électricité verte
Abonnement annuel (€/an)	98,26	234,59	75%
100 kWh _{ef} (€)	14,56	5,09	Électricité
Prix total pour 100 kWh _{ef} (€)	20,34	6,40	fossile

³⁵ Récapitulatif Standardisé d'Étude Thermique. Fiche de synthèse standardisée de l'étude thermique réglementaire d'un projet de construction neuve, soumis à la réglementation thermique RT2012.

³⁶ Observatoire de la Performance Énergétique.

³⁷ Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/r/pegase.html>.

³⁸ https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/les-couts-lisses-de-l-electricite-774441.html?amp=1&twitter_impression=true (sur les coûts de l'électricité).

³⁹ <https://theconversation.com/debat-pour-une-juste-estimation-du-cout-du-tout-renouvelable-114723> (à noter que les auteurs sont liés à EDF).

<https://theconversation.com/mix-electrique-pourquoi-lessor-des-renouvelables-est-le-scenario-le-plus-economique-108839> (d'un membre de l'ADEME).

<https://www.lemonde.fr/blog/huet/2018/04/19/la-cour-des-comptes-alerte-sur-le-cout-des-ent/> (alerte de la Cour des Comptes sur le coût des énergies renouvelables).

Il existe ensuite plusieurs théories et hypothèses de recherche concernant l'évolution prévisionnelle de ces prix (Branger, 2015; CEREMA and ADEME, 2017). Nos hypothèses de modélisation et de simulation concernant l'évolution du prix des énergies et leur dérive à moyen-terme sont présentées au chapitre 6 et discutées en chapitres 8. Dans MACARON, on conservera l'hypothèse selon laquelle la tension progressive du marché des énergies fossiles entraîne une augmentation de leur prix par kWh, quand la baisse du prix des énergies renouvelables s'explique par une demande croissante et des progrès technologiques. On appliquera une augmentation annuelle de +1%/an du prix des énergies fossiles et une diminution annuelle de -1%/an du prix des énergies renouvelables. On testera en chapitre 7 la sensibilité de MACARON à la dérive du prix des énergies.

3. MICF – Capacité Financière

3.1. Diagramme causal synthétique (MICF)

Le module MICF fait converger les flux de trésorerie générés par l'exploitation des bâtiments, c'est-à-dire les revenus annuels, produits de la location des logements du parc, et les charges associées aux dépenses de maintenance technique et d'entretien. Le modèle distingue les investissements d'entretien-maintenance du bâtiment traités au niveau MICRO, considérés comme systématiques, des investissements lourds et ponctuels destinés à la rénovation des bâtiments ou à l'adoption d'un nouveau système d'information, lesquels concernent la stratégie de gestion patrimoniale à l'échelle du parc. Les premiers sont destinés à assurer ce que nous avons appelé dans ces travaux un service minimal en contrepartie des revenus locatifs perçus annuellement et ne représentent pas un élément décisionnel. Les seconds en revanche relèvent à proprement parler de la stratégie numergétique du gestionnaire et peuvent être déclenchés ou non selon le niveau d'exigence de ce dernier. Les investissements numergétiques seront traités au niveau MESO.

Une des hypothèses développées en MICF est que la performance énergétique des bâtiments a un impact indirect sur l'occupation du parc, et donc les revenus du gestionnaire, à travers la prise en compte de la valeur verte (détail en chapitre 3 et annexe 1). Dans MICF on soutient en outre que le BIM et la rénovation peuvent influencer sur certains postes de dépenses de maintenance et d'entretien. On souhaite dès lors explorer ici l'impact indirect de différentes stratégies numergétiques de gestion du parc (faisant varier l'intensité des rénovations, la fiabilité des modèles numériques...), sur ces coûts d'une part, sur les revenus locatifs d'autre part. L'objectif est de mesurer l'ampleur de la contrainte financière résultante qui s'applique sur la capacité d'investissement du décideur en MESO.

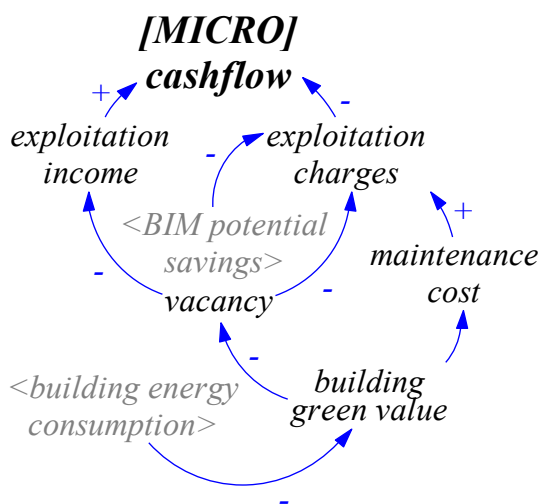


Figure 30. Diagramme causal MICF.

3.2. Diagramme de flux (MICF)

La Figure 31 page suivante présente notre traduction en diagramme de flux des causalités explicitées au paragraphe précédent et la Table 17 la nomenclature des éléments correspondants. MICF formalise la fluctuation des ressources rendues disponibles pour alimenter le niveau MESO. La contribution de MICF à la capacité d'investissement à l'échelle du parc pour les opérations de rénovation et d'implantation du BIM est détaillée en MECF.

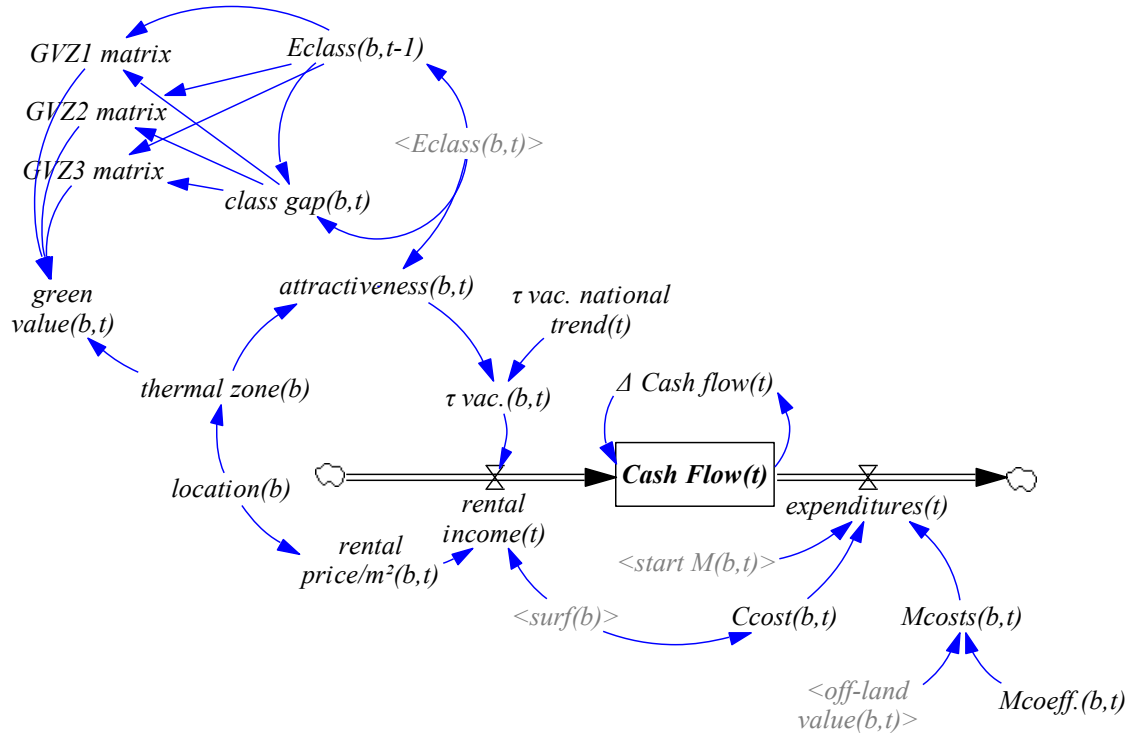


Figure 31. Diagramme de flux MICF.

Table 17. Nomenclature du diagramme de flux MICF.

<i>Cash Flow(t)</i>	Flux de trésorerie générés par les activités d'exploitation-maintenance de l'organisation au temps t, en euros. Bilan cumulé au moment t des revenus locatifs rental income(b,t) (revenus annuels générés par la location du bâtiment b au temps t, pondérés par $\tau vac.(b,t)$, son taux de vacance au moment t) et les dépenses expenditures(t) (somme annuelle des coûts Mcost(b,t) d'entretien et de nettoyage du bâtiment b au temps t). Un revenu locatif rental income(t) supérieur aux dépenses expenditures(t) entraîne un excédent de trésorerie $\Delta\ Cash\ Flow(t)$ qui est envoyé en MECF pour contribution financière à la gestion des actifs du parc de logements.
<i>rental income(t)</i>	Revenus locatifs générés par l'organisation au temps t, en euros. La localisation du parc de bâtiments est prise en compte pour établir une fourchette de prix locatifs rental price/m²(b,t) pour le bâtiment b au temps t qui soit représentative des spécificités du marché immobilier local. Les revenus locatifs à dégager de l'exploitation du bâtiment b au temps t sont également contraints par son occupation $\tau vac.(b,t)$. Ces revenus ont un impact sur la capacité financière de l'organisation en MECF.
<i>expenditures(b,t)</i>	Frais d'entretien-maintenance du bâtiment b au temps t, en euros. Ils se composent d'un poste d'entretien Ccost(b,t) et d'un coût de maintenance incluant les gros renouvellements Mcost(b,t) du bâtiment b au temps t. Les coûts de maintenance Mcost(b,t) du bâtiment b au temps t représentent une fraction Mcoeff.(b,t) de sa valeur hors-foncier off-land value(b,t) tel que décrit plus amplement ci-après ainsi qu'au chapitre 3.
<i>green value(b,t) / attractiveness(b,t) / $\tau vac.(b,t)$</i>	Le coefficient de valeur verte green value(b,t) est une externalité financière de l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment b au temps t. Il traduit le lien mis en évidence au chapitre 3 entre l'efficacité énergétique du bâtiment b au temps t et son attractivité, attractiveness(b,t) , auprès des usagers, locataires potentiels du gestionnaire de patrimoine. La valeur verte des bâtiments, par le biais du coefficient d'attractivité dont il est la cause, impacte les dynamiques d'occupation $\tau vac.(b,t)$ du bâtiment b au temps t.
<i>GVZ(1, 2, 3) matrix</i>	Matrices des coefficients de valeur verte applicables en zones thermiques 1, 2 et 3.

3.2.1. Capacité financière

Le flux de trésorerie $Cash\ Flow(t)$ représente les ressources financières rendues annuellement disponibles par les activités de gestion locative incluant l'entretien-maintenance des bâtiments. Il est déterminé par la différence du flux entrant de revenus issus exclusivement des produits locatifs $rental\ income(t)$ et du flux sortant des dépenses de maintenance $expenditures(t)$. À chaque pas de temps l'excédent de $Cash\ Flow(t)$ est projeté au niveau MESO via la variable $\Delta Cash\ flow(t)$ où il alimente la capacité financière du parc.

Éq. 4

$$Cash\ Flow(t) = Cash\ Flow(t - 1) + rental\ income(t) - expenditures(t) - \Delta Cash\ flow(t)$$

Où :

$Cash\ Flow(t)$	est le flux de trésorerie généré par les activités d'exploitation-maintenance de l'organisation au temps t, en euros
$rental\ income(t)$	est le montant des revenus locatifs générés par l'organisation au temps t, en euros
$expenditures(t)$	est le montant des frais d'entretien-maintenance du bâtiment b au temps t, en euros
$\Delta Cash\ flow(t)$	est le montant de la contribution financière dégagé au temps t pour la gestion des actifs du parc de logements, en euros

3.2.2. Revenus locatifs

Le calcul des revenus locatifs $rental\ income$ s'appuie la valeur locative des bâtiments $rental\ value(b,t)$, modérée par leur taux d'occupation respectif. Celui-ci pondère la surface de parc à considérer et permettra d'exprimer la perte de revenus que représente la vacance des logements.

L'externalité de valeur verte VV est introduite ici pour refléter l'impact de l'amélioration de la classe énergétique d'un bâtiment sur son attractivité aux yeux des usagers (DINAMIC, 2015). Le coefficient de valeur verte est fonction de la zone thermique et donc de la localisation géographique des bâtiments afin de rappeler l'intérêt relatif porté à la performance énergétique en fonction de l'environnement direct (relation particulièrement complexe qui pourrait également être développée avec des contraintes de moyens des ménages en NA ou de tension immobilière en MA). L'amélioration de $Eclass(b,t)$ entraîne dans le modèle la réévaluation de sa valeur hors foncier $off-land\ value(b, t)$ d'où résultent les coûts de rénovation et d'entretien (l'impact de la valeur verte (b, t) fait partie des éléments analysés dans ces travaux aux chapitres 6 et 7).

Mais la décroissance accélérée du taux d'occupation du parc en cas de mauvaises performances énergétiques des bâtiments est-elle un levier suffisant pour inciter à la rénovation ? Notre hypothèse dans MACARON est que VV n'impacte pas directement le taux de vacance des bâtiments du parc. Notre choix a été de considérer que cette relation relevait de dynamiques plus générales dans les flux migratoires urbains et territoriaux, liés aux marchés de l'emploi, de l'éducation ou encore de la santé (Molines, 2007). Ces dynamiques migratoires pourraient, elles, potentiellement être modifiées par la prise en compte grandissante de la classe énergétique des logements. Dans des développements ultérieurs, MACARON pourrait être couplé à des modèles qui intègrent ces considérations pour le développement du niveau MACRO (voir chapitre 8). En effet, les prix par m² de loyer sont extrêmement sensibles aux conditions de marché (tension immobilière, qualité de l'environnement direct et indirect, situation dans et par rapport aux centres urbains...) dont un certain nombre dépend directement de la localisation du bien immobilier (Thion, 1994). On s'appuie sur les données fournies par l'Association CLAMEUR⁴⁰ pour représenter l'impact de la variation de la valeur locative en fonction de la localisation géographique départementale du parc.

⁴⁰ Les loyers de marché 2018 : <http://www.clameur.fr/Tendances-du-marche/Tendances-departementales/Les-loyers-de-marche>

3.2.3. Dépenses courantes d'entretien-maintenance

Les dépenses d'entretien-maintenance $expenditures(b,t)$ comprennent les frais de nettoyage $Ccost(b,t)$ clairement identifiés dans la littérature comme gisement d'économies financières à l'adoption du BIM (Celnik et al., 2015), et le coût des travaux de maintenance $Mcosts(b,t)$ ⁴¹, dont on suppose ici qu'il peut varier après rénovation des bâtiments. Les dépenses d'entretien-maintenance sont déclenchées annuellement, de façon systématique, même en situation de rénovation des bâtiments. On considèrera pour simplifier que les opérations de rénovation sont pratiquées en site occupé et n'engendrent pas de vacance des bâtiments (de type relogement pendant les travaux). Le gestionnaire est ainsi tenu d'assurer un service minimal sur le parc quelle que soit sa stratégie numergétique. La variable d'obsolescence pourrait permettre d'appliquer d'autres lois pour représenter les irrégularités ou interruptions de maintenance et en observer l'impact, par exemple en termes de consommation ou d'attractivité (cf. chapitre 8).

Pour introduire un lien indirect avec la complexité de l'ouvrage, dont on admet que c'est principalement elle qui aura un impact majeur sur le coût et l'intensité des travaux de maintenance, on utilise un coefficient de distribution aléatoire $Mcoeff.(b,t)$ qui permet dans MACARON de diversifier l'intensité des flux monétaires de maintenance, et donc le degré de contrainte financière, à travers le parc. Le calcul du coût de maintenance de chaque bâtiment repose sur le produit de sa valeur hors foncier et de son coefficient de maintenance tel que détaillé dans les paragraphes suivants.

Les valeurs à considérer dans le calcul de la valeur hors foncier d'un bâtiment sont détaillées et mises à jour annuellement dans la fiche d'application⁴² de (ADEME et al. 2011) qui accompagne la Réglementation Thermique des Bâtiments Existants. Ce document indique une valeur de 1570 €/m² (SHON – Surface Hors Œuvre Nette) pour les bâtiments à usage principal d'habitation au 1^{er} janvier 2018.

On s'appuie par ailleurs, pour déterminer les bornes de $Mcoeff.(b,t)$, sur le dossier produit par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire concernant le calcul du coût global d'un ouvrage⁴³. Y sont présentées les fourchettes de coût d'exploitation au m² établies pour chacun des postes recensés en Table 18. Ces fourchettes constituent des ordres de grandeur moyens à l'échelle nationale des montants annuels récurrents ou périodiques des postes relatifs à la maintenance.

Table 18. Coûts moyens par poste de maintenance préconisés par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire pour le calcul en coût global des dépenses d'entretien.

Phase	Poste	Prix
Maintenance	Gestion	1 à 2 €HT/m ²
	Maintenance courante du bâti	4 à 10 €HT/m ²
	Maintenance courante des équipements	3 à 6 €HT/m ²
	Gros entretien-Remplacement	10 à 30 €HT/m ²
	Nettoyage	4 à 8 €HT/m ²
TOTAL		22 à 56 €HT/m ²
Hors Gestion et Nettoyage		17 à 46 €HT/m ²

On retient une fourchette des coûts de maintenance (hors gestion et nettoyage) allant de 17 €/m² à 46 €/m², lesquels représentent respectivement 1% et 3% de la valeur hors foncier réglementaire.

⁴¹ Nous avons considéré que les investissements de Gros Entretien – Remplacement étaient inclus dans ce poste de dépense.

⁴² Calcul de la valeur d'un bâtiment : https://www.rt-batiment.fr/documents/rtexistant/fiches_applications/20190515_FA_calcul_valeur_b%C3%A2timent_RTexistan_t_v1.8.pdf.

⁴³ Calcul du Coût Global : <http://www.coutglobal.developpement-durable.gouv.fr/aide/decouvrir/origine/menu#exploitation>.

On applique une distribution d'ordre aléatoire de $Mcoeff.(b,t)$ sur l'intervalle [1% ; 3%] à tous les bâtiments du parc tel que :

Éq. 5

$$Mcoeff.(b,t) = 0.01 + (0.03 - 0.01) \times RANDOM(0,1)$$

Où :

$Mcoeff.(b,t)$ est le coefficient de maintenance du bâtiment b au temps t

Le calcul du coût de maintenance $Mcosts(b,t)$ d'un bâtiment b à l'instant t résulte ensuite du produit de sa valeur hors foncier $off\ land\ value(b,t)$ et de son coefficient de maintenance $Mcoeff.(b,t)$ selon l'équation suivante :

Éq. 6

$$Mcosts(b,t) = off - land\ value(b,t) \times Mcoeff.(b,t)$$

Où :

$Mcosts(b,t)$	est le montant des coûts de maintenance pour le bâtiment b au temps t , en euros
$off-land\ value(b,t)$	est le montant de la valeur hors-foncier du bâtiment b au temps t , en euros
$Mcoeff.(b,t)$	est le coefficient de maintenance du bâtiment b au temps t

4. MIDN – Déploiement Numérique

4.1. Diagramme causal synthétique (MIDN)

La maîtrise de la gestion des données est un élément essentiel de la productivité de l'organisation pour l'exploitation raisonnée du parc immobilier (Feldman and Sherman, 2001; FIDJI and Mazars, 2011). Ainsi, la création et la maintenance de contenus de données techniques fiables sur le stock de logements constituent le défi que doivent relever les gestionnaires de patrimoine. Cela est particulièrement vrai dans le cas d'un changement organisationnel tel que l'adoption du BIM qui impacte fortement les processus internes, entraînant éventuellement une dérive des flux de travail au fil du temps.

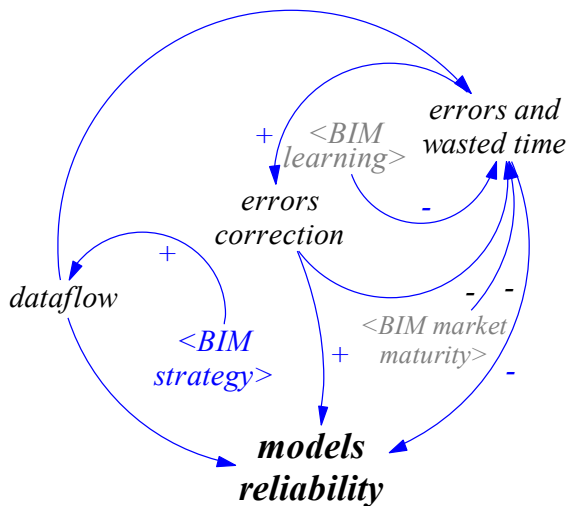


Figure 32. Diagramme causal MIDN.

Dans ce contexte, la mise en œuvre du BIM implique de nombreuses considérations techniques à prendre en compte pour la mise en œuvre d'un nouveau modèle de données répondant aux objectifs et contraintes propres à l'organisation (Cluzel, 2006). Abordant les contraintes liées à l'acquisition, au traitement et à la mise à jour des données dans le respect de la technologie BIM, le sous-modèle DN vise à représenter les mécanismes de la transition numérique et technologique du parc de logements en prenant en compte :

- La stratégie de mise en œuvre du BIM et, par conséquent, l'impact des compétences en ressources humaines sur les flux de travail de gestion des données,

- La création ou la perte de valeur impliquée par ces stratégies, basée sur les pertes de temps évitées (ou non), les coûts et/ou les retards assimilés,
- L'évaluation de la fiabilité globale des modèles de données obtenus.

En couplant ces dynamiques, nous souhaitons suivre la variation de la fiabilité des ressources informationnelles en fonction du contenu de données ciblé (y compris sans BIM) et de son impact sur la création de connaissances de qualité dans [MESO].

4.2. Diagramme de flux (MIDN)

La Figure 33 présente notre traduction en diagramme de flux des causalités précédemment explicitées. La nomenclature des éléments qui composent MIDN est détaillée en Table 19. Le paragraphe §4.2.1 aborde la modélisation du processus de gestion de données et présente les équations des éléments *unreliable data treatment flow(b,t)*, *Uncorrected Data(b,t)* et *qDM(b,t)*. Le paragraphe §4.2.2 détaille la modélisation des flux de données improductifs *τ unprod. dataflow(b,t)* et des gains BIM potentiels *collab. gains(b,t)* et *interop. gains(b,t)*.

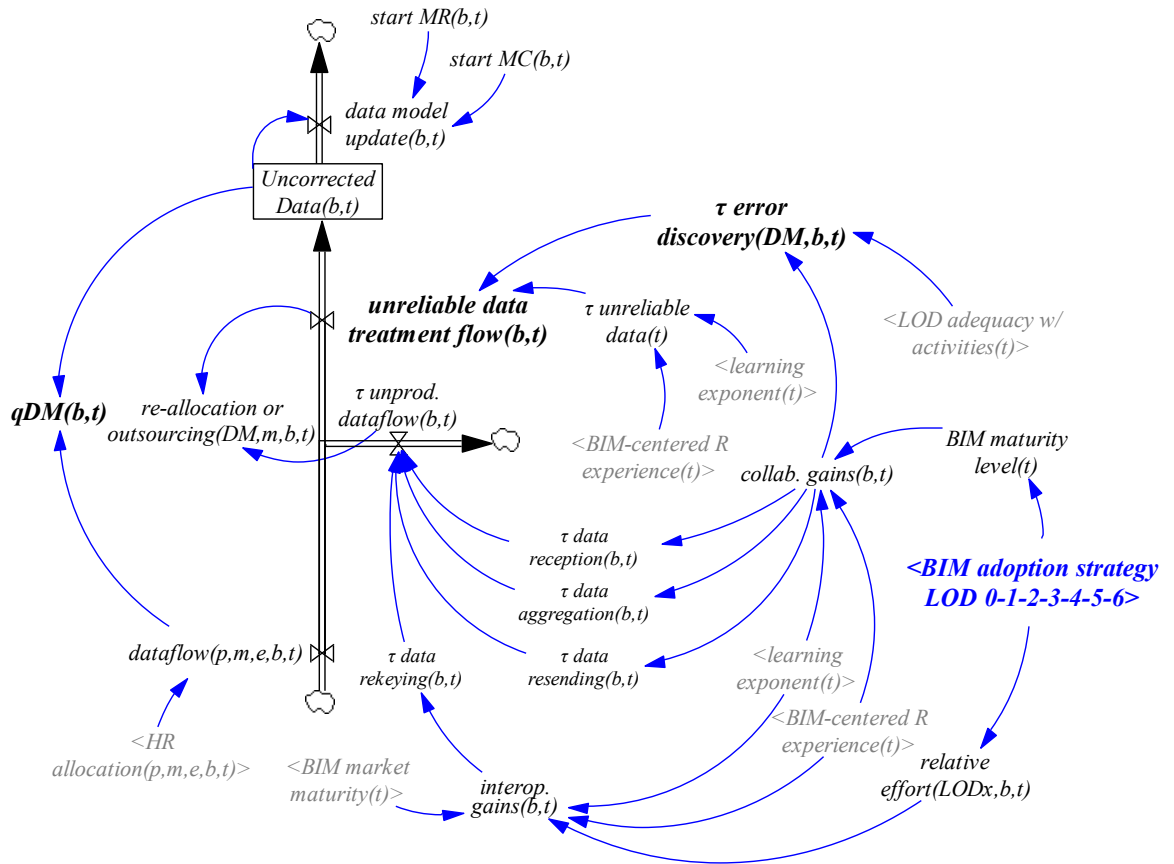


Figure 33. Diagramme de flux MIDN

Table 19. Nomenclature du diagramme de flux MIDN.

<i>dataflow(p,m,e,b,t)</i>
Flux de gestion de données par phase p associés aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e selon le dimensionnement prévu par le modèle. L'allocation de ressources humaines aux différentes missions à réaliser annuellement HR allocation(p,m,e,b,t) , qui définit notamment les flux de travail et ici le dataflow(p,m,e,b,t) , est réalisée en MERH.
<i>τ unprod. dataflow(b,t)</i>
Proportion des flux de traitement de données improductifs par nature (échanges, ressaisie et agrégation de données) pour le bâtiment b à l'instant t, avec τ unprod. dataflow(i) le taux initial (référence sans BIM) du bâtiment b au temps t = 0.
<i>relative effort(LODx,b,t) / interop. gains(b,t) / τ data rekeying(b,t)</i>
relative effort(LODx,b,t) est le coefficient d'effort relatif attribué au bâtiment b à l'instant t en fonction du LOD qui lui est associé. C'est un des éléments de description du comportement de référence du modèle. Il varie sur une plage de valeurs discrètes allant de 0 à 1, un effort relatif de 0 étant associé à un LOD0 (pas de numérisation, inaction) et un effort relatif de 1 étant associé à un LOD5 (jumeau numérique, effort maximal) (détail en annexe 2). L'effort relatif associé au LOD du bâtiment b à l'instant t pondère les coûts et les flux de travail à allouer à la numérisation et à la gestion de données, ainsi que les gains potentiels d'interopérabilité provoqués par l'introduction du BIM

dans le processus opérationnel de gestion de **données interop. gains(b,t)**. Seul le taux de ressaisie manuelle des informations τ **data rekeying(b,t)** est affecté par les gains d'interopérabilité **interop. gains(b,t)**. Les autres ratios de temps improductifs τ **data reception, resending, aggregation(b,t)** sont eux concernés par l'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes **collab. gains(b,t)** à l'intégration du BIM, traités ci-dessous.

BIM maturity level(t) / collab. gains(b,t) / τ data reception, aggregation, resending(b,t)

BIM maturity level(t) fait écho à la définition présentée en chapitre 1 des différents niveaux de maturité (ou d'intégration) du BIM (isolé, fédéré, intégré). On suppose en effet que l'amélioration potentielle de la collaboration et de l'interopérabilité logicielle dépend partiellement de ce niveau de maturité choisi par l'organisation. Dans ces travaux **BIM maturity level(t)** est désactivé par manque de données permettant d'élaborer des hypothèses tangibles, on lui attribue la valeur de 1. **collab. gains(b,t)** représente l'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes à l'instant t pour la gestion de données du bâtiment b. L'amélioration des processus collaboratifs internes **collab. gains(b,t)** provoque la diminution des ratios de temps improductifs τ **data reception, resending, aggregation(b,t)** à l'intégration du BIM, respectivement les ratios de temps passés aux échanges (réception et renvoi) des informations et à leur agrégation.

τ unreliable data(t)

Taux horaire de défauts de modélisation et de traitement de données engendrés par une heure de travail effective au temps t. Cette variable peut être rapprochée d'un coefficient de productivité attribué à l'organisation, dont l'évolution dépend de l'expérience BIM du décideur.

unreliable data treatment flow(b,t) / τ error discovery(DM,b,t)

unreliable data treatment flow(b,t) représente les flux de gestion de données alloués à la correction des données non fiables générées lors du traitement de données prévu pour le bâtiment b au temps t. Selon la politique interne du décideur, toutes les données non fiables découvertes sont corrigées par les opérateurs (cas retenu pour notre étude), ou non. Le taux de découverte de ces données non fiables par les opérateurs τ **error discovery(DM,b,t)** est sensible au LOD (taille et pertinence du contenu des données techniques), à l'amélioration des processus collaboratifs internes **collab. gains(b,t)** (via la fonctionnalité de *clash-detection*).

Uncorrected Data(b,t) / data model update(b,t)

Uncorrected Data(b,t) est le volume horaire représentatif du volume cumulé de données non fiables et non corrigées générées par les flux de travail en gestion de données. La mise à jour du modèle de données du bâtiment b prévue au temps t **data model update(b,t)** réinitialise le volume de données non corrigées **Uncorrected Data(b,t)** au démarrage des missions **MC(b,t)** de construction du modèle BIM du bâtiment b à l'instant t et / ou au démarrage des missions **MR(b, t)** de rénovation du modèle BIM du bâtiment b à l'instant t.

qDM(b,t)

Indice de qualité du modèle de données BIM du bâtiment b au temps t. Il représente le ratio du volume des données non corrigées sur le total des heures travaillées (cumul des flux de travail **dataflow(p,m,e,b,t)**).

re-allocation or outsourcing(DM,m,b,t)

Volume horaire réalloué en interne ou externalisé pour la réalisation de missions DM,m prévues pour le bâtiment b au temps t en fonction de la disponibilité résiduelle de la ressource humaine. Les flux de gestion de données alloués à la correction des données non fiables **unreliable data treatment flow(b,t)** provoquent dans le modèle une augmentation des temps à passer pour la réalisation des missions prévues pour le bâtiment b au temps t. Si l'équipe de travail n'est pas occupée à 100% au même instant, on lui affecte ces flux de retraitement jusqu'à ce qu'elle le soit. S'il reste des flux de travail ou de retraitement non réalisés et que ceux-ci dépassent la capacité maximale des ressources humaines disponibles en interne, ils sont externalisés et représentent un surcoût pour l'organisation.

4.2.1. Processus opérationnel de gestion de données

En modélisation par la dynamique des systèmes complexes, une charge de travail est vidée par un flux de travail qui remplit un stock de travail accompli. Les flux de travail, déterminés par les capacités réelles d'une organisation ou d'une machine, sont pondérés par un coefficient de productivité qui reflète l'imperfection ou la non-qualité intrinsèque à tout processus humain ou machine. Une vision commune de ce phénomène en DSC est que les flux de travail concernés par la non-qualité :

- Constituent une charge de travail supplémentaire de retraitement (*rework* en anglais) : ils forment une boucle de rétroaction amplificatrice laquelle réapprovisionne la charge de travail au fur et à mesure du traitement des flux de travail demandés et d'autant plus que le coefficient de productivité est faible ;
- Ne peuvent être traités que s'ils sont découverts ou connus ;
- Génèrent un retard dans l'accomplissement des tâches demandées ;

En conséquence, tout défaut découvert ne fait pas automatiquement l'objet d'un retraitement, qui relève de la politique qualité de l'organisation.

Le sous-modèle MIDN suit les mêmes principes, à cette exception près que MACARON ne mesure pas le temps qu'il faut aux effectifs pour accomplir les missions requises en fonction d'un taux de productivité donné. La période de travaux considérée est ici d'une année, durant laquelle le modèle a pour mission de réaliser la totalité de la charge de travail requise **HR allocation(p,m,e,b,t)** calculée en MERH. La productivité de l'organisation devient le résultat des effets agrégés de la stratégie numérique du décideur. Le choix a ainsi été fait ici de ne pas surcontraindre le modèle avec une possible accumulation des charges de travail. On stockera indépendamment (sans les faire boucler sur

la valve des flux de travail, donc) les flux de non-qualité *unreliable data treatment flow(b,t)* qui sont générés par les flux de traitement de données et découverts par les opérateurs.

Le calcul du volume des flux de gestion de données pour la correction des données non fiables pour le bâtiment b au temps t s'établit comme suit :

Éq. 7

$$\begin{aligned} unreliable\ data\ treatment\ flow(b,t) \\ = (\tau\ unreliable\ data(t) \times \tau\ error\ discovery(DM,b,t)) \times dataflow(p,e,m,b,t) \end{aligned}$$

Où :

<i>unreliable data treatment flow(b,t)</i>	sont les flux de gestion de données pour la correction des données non fiables générées lors du traitement de données pour le bâtiment b au temps t, en heures
$\tau\ unreliable\ data(t)$	est le taux horaire de défauts de modélisation et de traitement de données engendrés par une heure de travail effective au temps t, en pourcents
$\tau\ error\ discovery(DM,b,t)$	est le taux de découverte des données non fiables pour le bâtiment b au temps t en pourcents
<i>dataflow(p,m,e,b,t)</i>	est le flux de gestion de données par phase p associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e, en heures

Les défauts de traitement non découverts et donc non corrigés *uncorrected data(b,t)* génèrent ainsi une accumulation dans les modèles BIM de données non fiables. Dans MACARON ce stock est le cumul du temps qu'il faudrait pour les corriger et représente donc un volume horaire.

Éq. 8

$$\begin{aligned} uncorrected\ data(b,t) \\ = uncorrected\ data(b,t-1) \\ + \sum_{p,e,m} \left((dataflow(p,e,m,b,t) \times \tau\ unreliable\ data(t)) \right. \\ \left. \times (1 - \tau\ errors\ discovery(DM,b,t)) \right) - data\ model\ update(b,t) \end{aligned}$$

Où :

<i>uncorrected data(b,t)</i>	est le volume horaire représentatif du volume cumulé de données non fiables et non corrigées générées par les flux de travail en gestion de données associés au bâtiment b au temps t
<i>dataflow(p,m,e,b,t)</i>	est le flux de gestion de données par phase p associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e, en heures
$\tau\ unreliable\ data(t)$	est le taux horaire de défauts de modélisation et de traitement de données engendrés par une heure de travail effective au temps t, en pourcents
$\tau\ errors\ discovery(DM,b,t)$	est le taux de découverte des données non fiables pour le bâtiment b au temps t en pourcents
<i>data model update(b,t)</i>	est le flux de gestion de données par phase p associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e, en heures

Ce volume horaire est mis en regard de la charge de travail initialement estimée par MERH (somme de *dataflow(DM,e,m,b,t)* sur e, b et t). Dans la vision commune exprimée ci-avant, la productivité est un intrant au regard duquel on explore les délais d'une activité. Dans notre vision, la productivité de l'organisation est envisagée sous l'angle inverse afin mesurer la qualité des processus. L'indice de qualité du modèle de données BIM *qDM(b,t)* ainsi calculé va permettre de rendre compte du volume de non-qualité produit en une année de travail effectif, et de son évolution dans un contexte opérationnel changeant.

Le stock de données non fiables à l'origine de la non-qualité des modèles de données est réinitialisé au démarrage des missions *MC(b,t)* et *MR(b,t)*, respectivement les opérations de construction et de rénovation des modèles BIM. Les missions *MC(b,t)* et *MR(b,t)* sont également imparfaitement réalisées. La réinitialisation du stock de données non fiables résulte donc du calcul de l'indice « initial » de qualité du modèle de données BIM *qDM(b,t)* ; la gestion ultérieure des données ne peut ensuite, au mieux, que maintenir ce niveau de qualité dans un cas de gestion parfaite. Dans notre cas, la non-qualité des processus fera décroître progressivement *qDM(b,t)* et le niveau de connaissance qu'à l'organisation de son parc.

4.2.2. Évolution des temps improductifs en gestion de données

La non-qualité ne s'applique que sur des flux de gestion de données effectifs. Hypothèse est faite que les temps improductifs $\tau_{unprod\ dataflow}(b,t)$ ne génèrent pas de non-qualité. En revanche ils contraignent fortement la capacité financière et humaine de l'organisation, puisque les flux de travail improductif sont, comme les flux de retraitement des données, renvoyées en MESO. Ils font alors l'objet d'une réallocation en interne si les ressources humaines disponibles le permettent. Si tel n'est pas le cas, ils sont externalisés moyennant des surcoûts (voir allocation des ressources humaines en MERH), à imputer dès lors à l'incapacité de l'organisation d'achever les missions requises dans le temps imparti d'une année. Les temps improductifs $\tau_{unprod\ dataflow}(b,t)$ se composent des volumes horaires dédiés l'échange (réception et renvoi) des informations, à leur agrégation et à leur ressaisie $\tau_{data\ reception, resending, aggregation, rekeying}(b,t)$, selon (FIDJI and Mazars, 2011) tel que :

Éq. 9

$$\begin{aligned} \tau_{unprod.\ dataflow}(b,t) &= (\tau_{data\ aggregation}(b,t) + \tau_{data\ resending}(b,t) + \tau_{data\ rekeying}(b,t) \\ &\quad + \tau_{data\ reception}(b,t)) \times dataflow(p,e,m,b,t) \end{aligned}$$

Où :

$\tau_{unprod.\ dataflow}(b,t)$	est la proportion des flux de traitement de données improductifs par nature pour le bâtiment b à l'instant t
$\tau_{data\ aggregation}(b,t)$	est le ratio de temps improductif dédié à l'agrégation des données du bâtiment b au temps t
$\tau_{data\ resending}(b,t)$	est le ratio de temps improductif dédié au renvoi des informations du bâtiment b au temps t
$\tau_{data\ rekeying}(b,t)$	est le ratio de temps improductif dédié à la ressaisie des données du bâtiment b au temps t
$\tau_{data\ reception}(b,t)$	est le ratio de temps improductif dédié à la réception des données du bâtiment b au temps t
$dataflow(p,m,e,b,t)$	est le flux de gestion de données par phase p associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e, en heures

Tant d'un point de vue cognitif que purement pratique, l'utilisation du BIM possède de nombreux avantages. Outre la visualisation en 3D de l'information, le BIM offre précision (recollement, MVD), accès (centralisé, partagé), intégrité des données. Il va faciliter l'accès à l'information et assurer une meilleure fiabilité de celle-ci. En revanche, pour parvenir à maintenir ce système d'information « en temps réel », il demandera d'autant plus d'assiduité, de compétence et donc de temps qu'il contiendra de données. Nous supposons qu'un changement organisationnel tel que l'adoption du BIM a un impact important sur les processus de travail (Shang and Shen, 2014). L'hypothèse faite est que le BIM va modifier la structure des temps passés par la variation de :

- ratios de temps improductifs,
- coefficient de découverte,
- taux d'erreur par heure.

$\tau_{data\ reception, resending, aggregation}(b,t)$ sont sensibles à l'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes $collab.\ gains(b,t)$ à l'intégration du BIM.

Éq. 10

$$\tau_{data\ reception}(b,t) = 0.09 \times (1 - collab.\ gains(b,t))$$

Où :

$\tau_{data\ reception}(b,t)$	est le ratio de temps improductif dédié à la réception des données du bâtiment b au temps t
$collab.\ gains(b,t)$	est le taux d'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes à l'instant t pour la gestion de données du bâtiment b

Éq. 11

$$\tau \text{ data resending}(b, t) = 0.11 \times (1 - \text{collab. gains}(b, t))$$

Où :

- $\tau \text{ data resending}(b, t)$ est le ratio de temps improductif dédié au renvoi des informations du bâtiment b au temps t
- $\text{collab. gains}(b, t)$ est le taux d'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes à l'instant t pour la gestion de données du bâtiment b

Éq. 12

$$\tau \text{ data aggregation}(b, t) = 0.12 \times (1 - \text{collab. gains}(b, t))$$

Où :

- $\tau \text{ data aggregation}(b, t)$ est le ratio de temps improductif dédié à l'agrégation des données du bâtiment b au temps t
- $\text{collab. gains}(b, t)$ est le taux d'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes à l'instant t pour la gestion de données du bâtiment b

Le taux de ressaisie manuelle des informations $\tau \text{ data rekeying}(b, t)$ est lui affecté par les gains d'interopérabilité $\text{interop. gains}(b, t)$.

Éq. 13

$$\tau \text{ data rekeying}(b, t) = 0.14 \times (1 - \text{interop. gains}(b, t))$$

Où :

- $\tau \text{ data rekeying}(b, t)$ est le ratio de temps improductif dédié à la ressaisie des données du bâtiment b au temps t
- $\text{interop. gains}(b, t)$ est le taux de gains potentiels d'interopérabilité provoqués par l'introduction du BIM dans le processus opérationnel de gestion de données attribué au bâtiment b au temps t

Les aspects collaboratifs sont apparentés à l'expérience de l'organisation en matière de BIM (voir MERH). Plus les effectifs pratiquent le BIM, plus ils augmentent leur capacité à tirer profit des outils collaboratifs. On sous-entend ici la notion de facilitation au cours du temps, incarnée par le coefficient d'apprentissage $\text{learning exponent}(t)$. Dans MACARON a également été prévue une relation causale avec le niveau de maturité du BIM (1, 2 ou 3 : cf. chapitre 1). Bien que stratégique, cette relation a été désactivée dans les travaux en raison de la difficulté à en préciser la nature. Elle n'est représentée que pour amorcer une réflexion sur le niveau d'intégration du BIM (cf. chapitre 8).

Éq. 14

$$\text{collab. gains}(b, t) = \text{BIM maturity level}(t) \times \text{BIM} - \text{centered R Experience}(t)^{\text{learning exponent}(t)}$$

Où :

- $\text{collab. gains}(b, t)$ est le taux d'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes à l'instant t pour la gestion de données du bâtiment b
- $\text{BIM maturity level}(t)$ est le niveau de maturité du BIM (isolé, fédéré, intégré) choisi lors de sa mise en œuvre à $t=T0$
- $\text{BIM-centered R Experience}(t)$ est l'expérience de l'organisation à l'instant t, en nombre d'années cumulées, de la pratique de rénovations BIM-centrées sur le parc
- $\text{learning exponent}(t)$ est le coefficient d'apprentissage de l'organisation au temps t

Les gains d'interopérabilité, s'ils relèvent eux aussi partiellement de l'évolution de l'expérience de l'organisation en matière de BIM, sont également soumis aux dynamiques d'évolution de l'environnement numérique *BIM market maturity(t)* et à la stratégie de numérisation du décideur incarnée par le LOD, tel que décrit dans l'équation Éq. 15.

Éq. 15

$$\begin{aligned} interop.gains(b,t) \\ = ((BIM\ market\ maturity(t) - 0.5) \times relative\ effort(LOD,b,t)) \times BIM \\ - centered\ R\ Experience(t)^{learning\ exponent(t)} \end{aligned}$$

Où :

<i>interop.gains(b,t)</i>	est le taux de gains potentiels d'interopérabilité provoqués par l'introduction du BIM dans le processus opérationnel de gestion de données attribué au bâtiment b au temps t
<i>BIM market maturity(t)</i>	est le niveau de maturité technique des outils et processus BIM au temps t, en pourcents
<i>relative effort(LOD,b,t)</i>	est le coefficient d'effort relatif attribué au bâtiment b à l'instant t en fonction du LOD qui lui est associé
<i>BIM-centered R Experience(t)</i>	est l'expérience de l'organisation à l'instant t, en nombre d'années cumulées, de la pratique de rénovations BIM-centrées sur le parc
<i>learning exponent(t)</i>	est le coefficient d'apprentissage de l'organisation au temps t

L'équation Éq. 7 présentée ci-avant montre que *unreliable data treatment flow(b,t)* est fonction de $\tau error\ discovery(DM,b,t)$ et $\tau unreliable\ data(t)$, eux-mêmes fonction de stratégie et expérience BIM, dont les équations s'écrivent :

Éq. 16

$$\tau error\ discovery(DM,b,t) = 0.71 \times (1 + collab.gains(b,t) \times \tau activities\ adeq.(b,t))$$

Où :

$\tau error\ discovery(DM,b,t)$	est le taux de découverte des données non fiables pour le bâtiment b au temps t en pourcents
<i>collab.gains(b,t)</i>	est le taux d'amélioration potentielle des processus collaboratifs internes à l'instant t pour la gestion de données du bâtiment b
<i>LOD adequacy w/ activities(t)</i>	est le taux d'adéquation du LOD choisi avec les activités de gestion de patrimoine immobilier attribué au modèle de données du bâtiment b au temps t. On considérera ici que le LOD500 possède un taux d'adéquation optimal. Les hypothèses mises en œuvre dans ces travaux sont présentées en annexe 2.

Éq. 17

$$\begin{aligned} \tau unreliable\ data(t) \\ = ((BIM\ market\ maturity(t) - 0.5) \times relative\ effort(LOD,b,t)) \times BIM \\ - centered\ R\ Experience(t)^{learning\ exponent(t)} \end{aligned}$$

Où :

$\tau unreliable\ data(t)$	est le taux horaire de défauts de modélisation et de traitement de données engendrés par une heure de travail effective au temps t, en pourcents
<i>BIM market maturity(t)</i>	est le niveau de maturité technique des outils et processus BIM au temps t, en pourcents
<i>relative effort(LOD,b,t)</i>	est le coefficient d'effort relatif attribué au bâtiment b à l'instant t en fonction du LOD qui lui est associé
<i>BIM-centered R Experience(t)</i>	est l'expérience de l'organisation à l'instant t, en nombre d'années cumulées, de la pratique de rénovations BIM-centrées sur le parc
<i>learning exponent(t)</i>	est le coefficient d'apprentissage de l'organisation au temps t

5. MIRH – Ressources Humaines

5.1. Diagramme causal synthétique (MIRH)

Le sous-modèle RH (Figure 34 page suivante) représente notre vision du processus opérationnel de rénovation et de maintenance. On y modélise l'impact de l'implantation du BIM sur les temps passés par la ressource humaine : la surcharge de travail issue de la gestion de données, le temps à dédier à la formation, leurs conséquences sur la qualité des flux de travaux et des rénovations. Interviennent dans cette modélisation des facteurs tels que le niveau de compétence requis par la stratégie de numérisation, l'apprentissage par l'expérience.

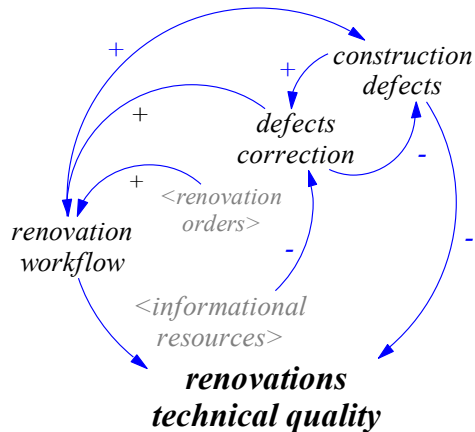


Figure 34. Diagramme causal MIRH

Dans ce sous-modèle, nous avons supposé que des informations manquantes ou peu fiables relatives à l'état des bâtiments généraient des défauts de construction (Ahzahar et al., 2011; Han et al., 2013; Lopez et al., 2010; Volk et al., 2014). Or les défauts de conception ou de construction non corrigés altèrent les performances énergétiques d'un bâtiment de manière significative (Aïssani et al., 2016; Alencastro et al., 2018; Ma et al., 2012).

Le BIM peut fournir des niveaux de contenu et des fonctionnalités très hétérogènes (comme la détection de collisions en phase synthèse, par exemple). L'objectif ici est d'explorer les conséquences de différents scénarios d'adoption du BIM (volumes de données, date de déploiement...) sur le niveau de qualité atteint par les travaux de rénovation. Ce sous-modèle a en outre été pensé pour contribuer en MACRO à la représentation de processus opérationnels multi-agents et donc à l'analyse de la contribution de performances individuelles à la performance collective multi-agents, par exemple par la superposition de multiples sous-modèles RH.

5.2. Diagramme de flux (MIRH)

La Figure 35 page suivante présente notre traduction en diagramme de flux des causalités explicitées au paragraphe précédent. La nomenclature des éléments qui composent MIRH est détaillée en Table 20 ci-après. Le paragraphe §5.2.1 présente la modélisation du processus opérationnel de rénovation. Le paragraphe §5.2.2 détaille le processus d'évaluation de la qualité technique de travaux de rénovation.

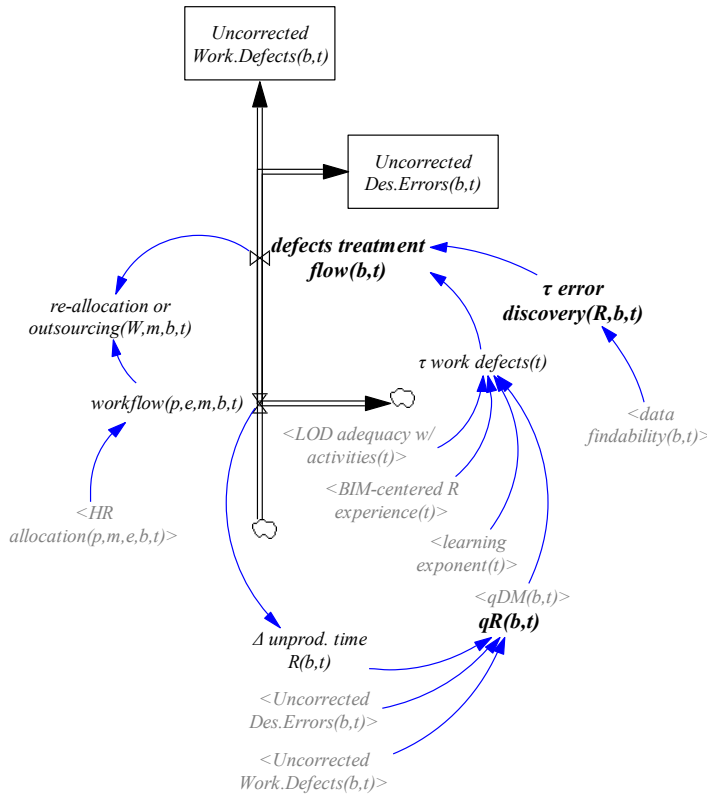


Figure 35. Diagramme de flux MIRH.

Table 20. Nomenclature du diagramme de flux MIRH

<i>workflow(p,m,e,b,t)</i>	Flux de travail par phase p associés aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e selon le dimensionnement prévu par le modèle. MIRH ne considère que <i>workflow(R,e,m,b,t)</i> ; <i>workflow(DM,e,m,b,t)</i> est traité en MIDN. L'allocation de ressources humaines aux différentes missions à réaliser annuellement <i>HR allocation(p,m,e,b,t)</i> , qui définit notamment les flux de travail et ici le <i>workflow(p,m,e,b,t)</i> , est réalisée en MERH.
<i>defects treatment flow(b,t) / τ error discovery(R,b,t)</i>	Représente les flux de travail alloués à la correction des défauts techniques générés lors des travaux de rénovation du bâtiment b au temps t. Seule une partie des défauts de construction est corrigée. La proportion de défauts corrigés est déterminée par le taux de découverte de ces défauts par les opérateurs <i>τ error discovery(R, b, t)</i> , associé au bâtiment b au temps t durant la phase de travaux R. Ce taux de découverte des erreurs est directement fonction de <i>data findability(b,t)</i> la trouvalité des données techniques pour la construction b au temps t. Selon la politique interne du décideur, tous les défauts de construction découverts sont corrigés par les opérateurs (cas retenu pour notre étude), ou non.
<i>τ work defects(t)</i>	Taux horaire de défauts de conception-construction provoqués par une heure de travail effective au temps t. Cette variable peut être rapprochée d'un coefficient de productivité attribué à l'organisation, dont l'évolution dépend de la stratégie et de l'expérience BIM du décideur.
<i>Uncorrected Des.Errors(b,t) / Uncorrected Work.Defects(b,t)</i>	Volume horaire représentatif du volume cumulé des défauts non-corrigés (erreurs de conception <i>Uncorrected Des.Errors(b,t)</i> ou de construction <i>Uncorrected Work.Defects(b,t)</i>) générés par les flux de travaux de rénovation (<i>workflow(R,e,m,b,t)</i>).
<i>qR(b,t)</i>	Indice de qualité technique des travaux de rénovation calculé pour le bâtiment b rénové à l'instant t. <i>qR(b,t)</i> s'approche également de la notion de productivité. Il représente le ratio du volume des défauts non-corrigés sur le volume total des heures travaillées (cumul des flux de travail (<i>workflow(R,e,m,b,t)</i>)). Nous avons vu au chapitre 3 et en MIPE au présent chapitre que <i>qR(b,t)</i> , en plus d'impacter l'efficacité des travaux, pouvait aussi engendrer une accélération de <i>τ obs.(b,t)</i> , le rythme auquel décroît <i>Econs/m²(b,t)</i> dans le temps du fait du vieillissement des composants du bâtiment.
<i>re-allocation or outsourcing(p,m,b,t)</i>	Volume horaire réalloué en interne ou externalisé pour la réalisation des missions m prévues pour le bâtiment b au temps t en fonction de la disponibilité résiduelle de la ressource humaine. La correction des défauts techniques <i>defects treatment flow(b,t)</i> provoque dans le modèle une augmentation des temps à passer pour la réalisation des missions prévues pour le bâtiment b au temps t. Si l'équipe de travail n'est pas occupée à 100% au même instant, on lui affecte ces flux de retraitement jusqu'à ce qu'elle le soit. S'il reste des flux de travail ou de retraitement non réalisés et que ceux-ci dépassent la capacité maximale des ressources humaines disponibles en interne, ils sont externalisés et représentent un surcoût pour l'organisation.

5.2.1. Processus opérationnel de rénovation

La structure du module MIRH est construite sur le même modèle et selon les mêmes théories que le module MIDN. Ainsi la ressource humaine fournit du temps de travail qu'elle dépense de trois façons :

- en temps de travail productif servant à réaliser la charge de travail requise $HR\ allocation(p,m,e,b,t)$ calculée en MERH,
- en temps de formation pour améliorer les compétences BIM des effectifs (également traité en MERH),
- en temps de travail improductif généré par des erreurs humaines ou des missions dont c'est la nature même.

La charge de travail demandée $HR\ allocation(p,m,e,b,t)$ est elle-même subdivisée en cinq types de missions : M, MM, R, MR, MC (*Maintenance, Model Maintenance, Renovation, Model Renovation, Model Construction*). Les missions techniques de maintenance et rénovation, M et R (voir détail en MECF), comportent à la fois les activités de travaux (phase $p=R$), et la gestion de donnée associée (phase $p=DM$). Les missions numériques MM, MR, MC respectivement la maintenance, la rénovation et la construction des modèles de données, concernent exclusivement la gestion de donnée (phase $p=DM$). Nous avons fait le choix de différencier études et travaux, puis la gestion de données exercée en phase d'étude de la gestion de données effectuée pendant les travaux. Ils ne représentaient pas en effet les mêmes enjeux ni en termes de poids, ni en termes d'impacts. Ainsi la gestion de données est beaucoup plus importante en phase d'étude que dans la phase travaux (pour rappel on se place dans le cas d'un bailleur non-social exerçant les fonctions de gestionnaire et de maître d'ouvrage), et elle conditionne davantage la variation du temps improductif. Dans la structure même du modèle, les erreurs humaines commises en phase d'étude sont répercutées en phase travaux (par l'intermédiaire de la fiabilité et de la trouvabilité de la donnée). *A contrario* les erreurs commises en phase travaux ne sont pas forcément identifiées et renvoyées en étude mais impactent directement dans ce cas la qualité de construction du bâtiment et ses performances (notamment énergétiques).

La capacité des opérateurs à s'apercevoir des défauts techniques durant la phase travaux est incarnée par la variable $\tau\ error\ discovery(R,b,t)$ laquelle dépend directement des ressources informationnelles fiables disponibles en interne, et impacte les temps passés en retraitement. Plus le taux de découverte des défauts s'approche de sa valeur maximale (100%), plus le gestionnaire est en mesure d'assurer la qualité des travaux. Selon la nature de sa politique interne qualité, le fait qu'il ait connaissance de l'intégralité des défauts techniques existants ne signifie pas pour autant qu'il prévienne de les corriger, mais simplement qu'il en a au moins la possibilité. Le traitement des défauts peut néanmoins provoquer une dérive significative des temps de travail, dérive qui a un impact économique fort à l'échelle de l'organisation comme nous le montrerons en MECF et MERH. Au contraire, un taux de découverte des défauts plus faible engendrera une dérive moins significative des flux de travaux mais aura en contrepartie des conséquences sur la qualité finale du parc rénové. On cherchera précisément ici à caractériser l'ampleur des impacts de la stratégie numérique et informationnelle choisie par le décideur, considérée ici comme étant partiellement la cause de la non-qualité dans les processus techniques de rénovation.

Éq. 18

$$\begin{aligned} defects\ treatment\ flow(b,t) \\ = workflow(R,e,m,b,t) \times \tau\ work\ defects(t) \times \tau\ error\ discovery(R,b,t) \end{aligned}$$

Où :

$defects\ treatment\ flow(b,t)$	est le flux de travail alloué à la correction des défauts techniques générés lors des travaux de rénovation du bâtiment b au temps t
$workflow(R,e,m,b,t)$	est le flux de travail demandé en phase de travaux R, associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e
$\tau\ work\ defects(t)$	est le taux horaire de défauts de conception-construction provoqués par une heure de travail effective au temps t
$\tau\ error\ discovery(R,b,t)$	est le taux de découverte des défauts pour le bâtiment b au temps t en pourcents

Éq. 19

$$\begin{aligned} \tau \text{ work defects}(t) = & \\ & SI(BIM \text{ experience}(t) = 0) \\ & ALORS (\tau \text{ work defects}(t) = 1 - qDM(b, t) \times LOD \text{ adequacy w/ activities}(t)) \\ & SINON (\tau \text{ work defects}(t) \\ & \quad = (1 - qDM(b, t) \times \tau \text{ activities adeq.}(t)) \times BIM - centered R \text{ Experience}(t)^{\wedge} \\ & \quad - learning \text{ exponent}(t)) \end{aligned}$$

Où :

$\tau \text{ work defects}(t)$	est le taux horaire de défauts de conception-construction provoqués par une heure de travail effective au temps t
$BIM - centered R \text{ Experience}(t)$	est l'expérience de l'organisation à l'instant t, en nombre d'années cumulées, de la pratique de rénovations BIM-centrées sur le parc
$qDM(b, t)$	est l'indice de qualité du modèle de données BIM du bâtiment b au temps t
$LOD \text{ adequacy w/ activities}(t)$	est le taux d'adéquation du LOD choisi avec les activités de gestion de patrimoine immobilier attribué au modèle de données du bâtiment b au temps t
$learning \text{ exponent}(t)$	est le coefficient d'apprentissage de l'organisation au temps t

Éq. 20

$$\tau \text{ error discovery}(R, b, t) = data \text{ findability}(b, t)$$

Où :

$\tau \text{ error discovery}(R, b, t)$	est le taux de découverte des défauts pour le bâtiment b au temps t en pourcents
$data \text{ findability}(b, t)$	est le coefficient de trouvabilité des informations calculé pour le modèle de données du bâtiment b au temps t

Les défauts techniques non découverts et donc non corrigés génèrent une accumulation de non-qualités semblable à $Uncorrected \text{ Data}(b, t)$ en MIDN. Cependant, le diagramme montre ici notre tentative de différencier les défauts techniques de conception $Uncorrected \text{ Des.Errors}(b, t)$ des défauts techniques de construction $Uncorrected \text{ Work.Defects}(b, t)$.

Une erreur peut prendre beaucoup plus de temps à être réparée qu'à être commise. Une solution erronée de conception sera ainsi beaucoup moins coûteuse si elle est identifiée avant sa mise en œuvre. On retrouve ce principe dans la vision de Mac Leamy (courbes de réparation d'erreurs) qui cherche à illustrer la variation du coût des modifications techniques et des changements d'ordres au cours du projet. Sur le modèle des travaux de (Lopez et al., 2010; Love et al., 2011, 2009) (*defect tracking*), nous avons conduit des tentatives de modélisation des causalités sur la performance énergétique, en différenciant défauts de construction et défauts de conception. Ces tentatives ont été abandonnées en raison de la trop grande complexité des relations de causalité au regard de l'objectif global visé. Elles restent toutefois une perspective très intéressante d'analyse de la relation entre transition numérique et transition énergétique.

Éq. 21

$$\begin{aligned} Uncorrected \text{ Des.Errors}(b, t) \\ = Uncorrected \text{ Des.Errors}(b, t - 1) + coeff \ a \times ((1 - \tau \text{ error discovery}(R, b, t)) \\ \times workflow(R, e, m, b, t) \times \tau \text{ work defects}(t)) \end{aligned}$$

Où :

$Uncorrected \text{ Des.Errors}(b, t)$	est le volume horaire représentatif du volume cumulé de défauts de conception non corrigés générés par les flux de travail en rénovation associés au bâtiment b au temps t
$coeff \ a$	est la proportion de défauts de conception sur le total des défauts de conception-construction
$\tau \text{ work defects}(t)$	est le taux horaire de défauts de conception-construction provoqués par une heure de travail effective au temps t
$\tau \text{ error discovery}(R, b, t)$	est le taux de découverte des défauts pour le bâtiment b au temps t en pourcents
$workflow(R, e, m, b, t)$	est le flux de travail demandé en phase de travaux R, associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e

Éq. 22

$$\begin{aligned} \text{Uncorrected Work.Defects}(b, t) \\ = \text{Uncorrected Work.Defects}(b, t - 1) + \text{coeff } b \\ \times \left((1 - \tau \text{ error discovery}(R, b, t)) \times \text{workflow}(R, e, m, b, t) \times \tau \text{ work defects}(t) \right) \end{aligned}$$

Où :

$\text{Uncorrected Work.Defects}(b, t)$	est le volume horaire représentatif du volume cumulé de défauts de construction non corrigés générés par les flux de travail en rénovation associés au bâtiment b au temps t
$\text{coeff } b$	est la proportion de défauts de construction sur le total des défauts de conception-construction
$\tau \text{ work defects}(t)$	est le taux horaire de défauts de conception-construction provoqués par une heure de travail effective au temps t
$\tau \text{ error discovery}(R, b, t)$	est le taux de découverte des défauts pour le bâtiment b au temps t en pourcents
$\text{workflow}(R, e, m, b, t)$	est le flux de travail demandé en phase de travaux R, associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e

Dans MACARON ces stocks représentent le cumul du temps qu'il faudrait pour corriger les défauts techniques sous forme de volumes horaires, lesquels sont réinitialisés lors des travaux de rénovation et résorbés par les opérations de maintenance, tel que nous l'abordons dans la section suivante.

5.2.2. Évaluation de la qualité technique de travaux

Le volume horaire des défauts techniques, considéré pour l'évaluation de la qualité des rénovations, est la somme de $\text{Uncorrected Des.Errors}(b, t)$ et $\text{Uncorrected Work.Defects}(b, t)$. Ce stock est mis en regard de la charge de travail initialement estimée par MERH (somme de $\text{workflow}(R, e, m, b, t)$ sur e , b et t) pour mesurer la qualité des processus, que l'on assimile ici à la qualité finale des rénovations $qR(b, t)$.

Éq. 23

$$\begin{aligned} qR(b, t) = (\Delta \text{ unprod.time } R(b, t) - (\text{Uncorrected Des.Errors}(b, t) \\ + \text{Uncorrected Work.Defects}(b, t))) \\ \div (\text{Uncorrected Des.Errors}(b, t) + \text{Uncorrected Work.Defects}(b, t)) \end{aligned}$$

Où :

$qR(b, t)$	est l'indice de qualité technique des travaux de rénovation calculé pour le bâtiment b rénové à l'instant t
$\Delta \text{ unprod.time } R(b, t)$	est le flux de gestion de données par phase p associé aux missions m, à réaliser sur le bâtiment b au temps t par les effectifs e, en heures
$\text{Uncorrected Des.Errors}(b, t)$	est le volume horaire représentatif du volume cumulé de défauts de conception non corrigés générés par les flux de travail en rénovation associés au bâtiment b au temps t
$\text{Uncorrected Work.Defects}(b, t)$	est le volume horaire représentatif du volume cumulé de défauts de construction non corrigés générés par les flux de travail en rénovation associés au bâtiment b au temps t

L'élément $qR(b, t)$ est considéré ici comme un coefficient d'évaluation de la qualité des rénovations, lequel n'évolue plus après que la rénovation d'un bâtiment a été effectuée (jusqu'à la prochaine rénovation dans le cas de rénovations multiples sur un même bâtiment). Dans des développements ultérieurs, les processus de maintenance des bâtiments pourraient, après rénovation, alimenter eux aussi le stock de défauts techniques : une maintenance imparfaite ferait alors décroître progressivement chaque $qR(b, t)$ et le niveau de qualité du parc. Dans ces travaux on se place dans un cas de gestion parfaite, laquelle résorbe à 100% l'obsolescence naturelle des bâtiments (voir diagrammes MIPE) et maintient le niveau de qualité $qR(b, t)$ des bâtiments du parc (sans toutefois pouvoir l'améliorer).

La rencontre de l'ensemble de ces dynamiques a vocation à faire émerger les conséquences financières, humaines et énergétiques de la non-qualité sur les coûts et les processus de gestion-exploitation.

6. Synthèse du chapitre 4 : fondamentaux de la sphère opérationnelle

L'objectif de modélisation du niveau MICRO est centré autour de la problématique de l'amélioration des performances du parc de bâtiments. L'articulation des sous-modèles MIPE, MICE, MIRH et MIDN nous a permis de mettre en œuvre, sur la base des matrices réalisées en chapitre 3, les différents niveaux de contraintes opérationnelles de rénovation, de maintenance et de numérisation qui sous-tendent les fonctions du niveau. Les réflexions menées et les hypothèses prises pour la modélisation quantitative de ce niveau nous ont conduits à identifier les éléments affectés par la stratégie du gestionnaire de patrimoine, puis à en décrire les impacts sur les comportements de référence de l'objet technique.

Ce chapitre met en évidence la grande complexité des interrelations créées entre les niveaux MICRO et MESO et la forte interdépendance des sphères opérationnelles et décisionnelles dans la définition de la stratégie numergétique d'exploitation du parc. Le niveau MICRO développé dans le présent chapitre va nous permettre, dans la phase d'exploitation de MACARON, de fournir une base solide pour l'observation de l'évolution du parc soumis à différentes configurations de la sphère décisionnelle, dont la modélisation fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5

DEVELOPPEMENT DU MODELE MACARON : NIVEAU MESO

« L'avenir n'est jamais que du présent à mettre en ordre.
Tu n'as pas à le prévoir, mais à le permettre. »
Antoine de Saint-Exupéry

1. DESCRIPTION DETAILLEE DU NIVEAU MESO.....	123
1.1. RAPPEL DES OBJECTIFS DE MODELISATION DU NIVEAU ME	123
1.2. PARAMETRES DE CONFIGURATION DU NIVEAU DECISIONNEL	126
1.2.1. <i>La stratégie BIM</i>	126
1.2.2. <i>La stratégie de rénovation</i>	127
2. MEPE – PERFORMANCE ÉNERGETIQUE	128
2.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MEPE).....	128
2.2. DIAGRAMME DE FLUX (MEPE)	128
2.2.1. <i>Coût des rénovations</i>	130
2.2.2. <i>Priorisation des commandes de rénovation</i>	131
3. MECF – CAPACITE FINANCIERE	132
3.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MECF).....	132
3.2. DIAGRAMME DE FLUX (MECF)	132
3.2.1. <i>Capacité financière de l'organisation</i>	134
3.2.2. <i>Évaluation de la faisabilité financière des investissements</i>	135
4. MEDN – DEPLOIEMENT NUMERIQUE	137
4.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MEDN).....	137
4.2. DIAGRAMME DE FLUX (MEDN)	137
4.2.1. <i>Densité informationnelle des modèles</i>	139
4.2.2. <i>Trouvabilité des informations techniques</i>	140
5. MERH - RESSOURCES HUMAINES	141
5.1. DIAGRAMME CAUSAL SYNTHETIQUE (MERH)	141
5.2. DIAGRAMME DE FLUX (MERH)	143
5.2.1. <i>Allocation de la ressource humaine et expérience BIM</i>	143
5.2.2. <i>Formations, qualification et apprentissage par l'expérience</i>	147
6. SYNTHESE DU CHAPITRE 5 : FONDAMENTAUX DE LA SPHERE DECISIONNELLE.....	151

Dans le précédent chapitre, nous avons détaillé la structure fonctionnelle du niveau MICRO : la sphère opérationnelle qui entoure l'objet technique dont le gestionnaire de patrimoine a la charge. Ce chapitre est dédié à la présentation de notre démarche de modélisation qualitative et quantitative du niveau MESO : l'organisation du gestionnaire de patrimoine immobilier et les processus décisionnels de la stratégie numergétique de gestion-exploitation du parc privé.

1. Description détaillée du Niveau MESO

1.1. Rappel des objectifs de modélisation du niveau ME

Le niveau MESO représente le système décisionnel et approche l'organisation du gestionnaire de patrimoine immobilier en charge de la gestion-exploitation du parc de bâtiments homogènes. La fonction globale de cette échelle spatiale est d'analyser les capacités d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments par le déclenchement des opérations de maintenance et de rénovation, et la gestion des ressources qui s'y rattachent.

En sciences des transitions, le niveau MESO peut être assimilé au régime (voir chapitre 3). Il exploite les informations produites par les niches pour formuler une réponse aux perturbations générées par l'évolution du paysage. Ce paysage englobe le contexte sociétal technique, les processus sectoriels et les matériels macroéconomiques, le changement climatique et les formations géographiques, les tendances démographiques, les idéologies politiques et les valeurs sociétales. Les tendances du paysage dessinées par cet ensemble de facteurs forment un contexte qui ne peut être influencé ni par les acteurs de niche (NANO, MICRO) ni de régime (MESO) au moins à court-terme (Papachristos, 2018).

Le niveau MESO a pour objectif d'étudier la création de valeur sur le parc à travers la gestion rationnelle des ressources et le choix stratégique des opérations numergétiques à mener sur les bâtiments. Le niveau MESO tel que conçu dans MACARON se compose de paramètres stratégiques exclusivement exogènes⁴⁴. Les boucles de rétroaction entre résultats et objectifs de la stratégie numergétique du décideur (goal-seeking) ne sont pas modélisées dans ces travaux (cf. chapitre 8) en dépit des préconisations de (Bérard, 2010) et (Papachristos, 2018). Le choix a été fait d'identifier des critères décisionnels afin de concevoir et d'analyser des scénarios de politique numergétique (chapitres 6 et 7). Il s'agit de mettre en lumière les événements (perturbations et sollicitations dues aux interactions des niches et du paysage) caractéristiques de la transition numergétique. La Figure 36 page suivante présente le diagramme résultant de la phase de modélisation causale du niveau MESO. Y sont représentées les interactions entre les différents sous-modèles :

- MEPE : processus décisionnel de priorisation/sélection des opérations de rénovation à réaliser sur le parc et choix des objectifs stratégiques à poursuivre ;
- MERH : affectation de personnel aux opérations d'exploitation et de gestion du parc de bâtiments et du système d'information ;
- MEDN : cycle de vie des données et processus de création et de maintenance de ressources informationnelles fiables et valorisables ;
- MECF : faisabilité financière des opérations requises et la capacité du décideur à réaliser des investissements numergétiques.

⁴⁴ Soit qu'ils incarnent des paramètres décisionnels internes : ce sont alors des intrants ; soit qu'ils incarnent des comportements de référence du système ou des éléments de paysage.

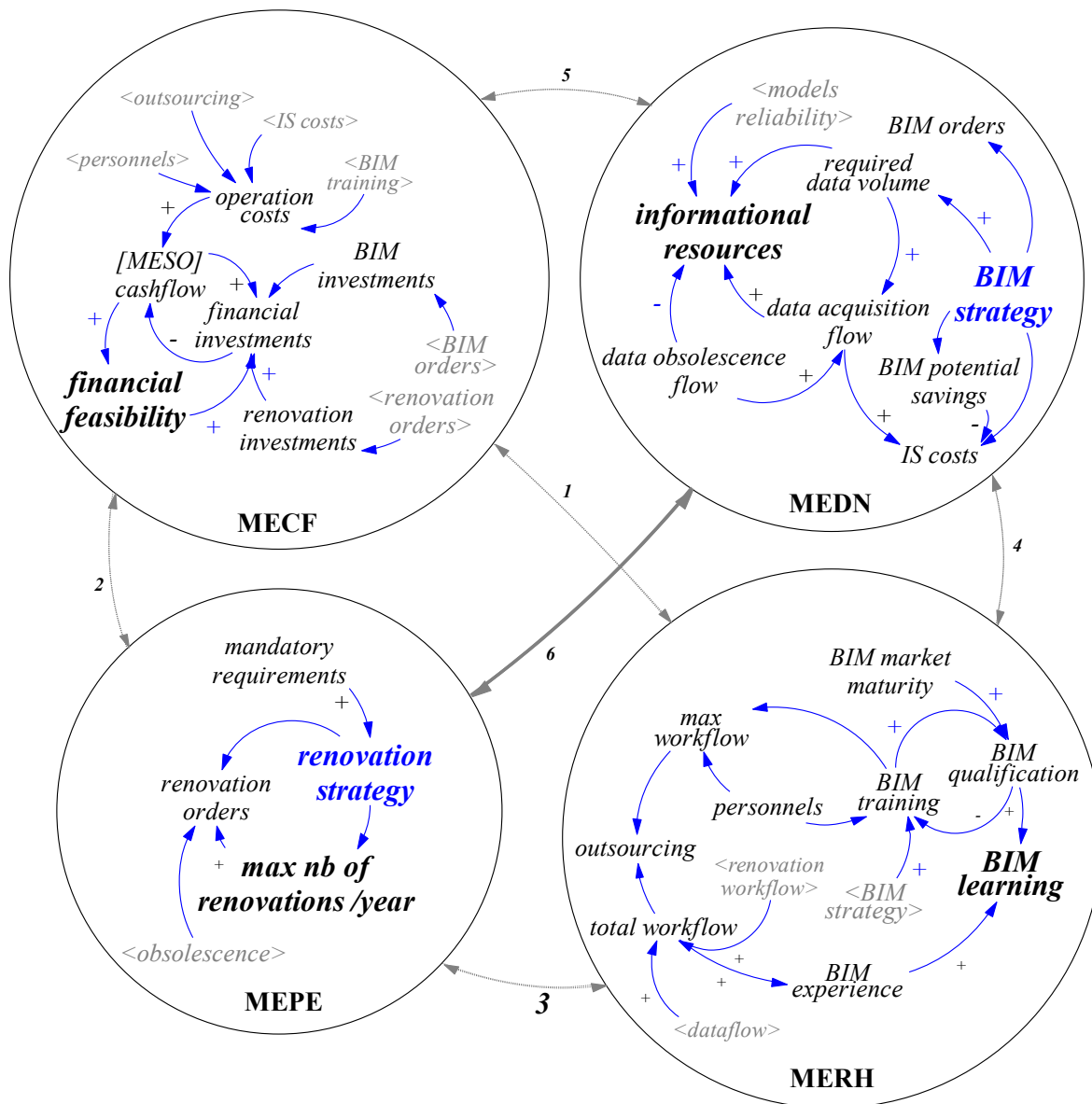


Figure 36. Diagramme causal du niveau MESO.

Ci-après sont présentées les hypothèses sous-tendues par les relations (1 à 6) entre les sous-modèles du niveau MESO. Les unités utilisées sont les suivantes :

- Valeurs financières : €
- Consommations énergétiques : kWhep ou kWhef (précisé selon les cas)
- Volumes horaires : heures

[ME] RH↔CF

L'activité de gestion locative dégage des bénéfices, dont l'accumulation constitue les moyens mobilisables par l'organisation pour les investissements stratégiques en rénovation et numérisation du parc. Ces bénéfices résultent d'une balance positive entre les dépenses opérationnelles et fonctionnelles courantes, dont les dépenses de main d'œuvre représentent un part non négligeable, et les recettes générées par la location. Les ressources humaines induisent des coûts salariaux ainsi que des dépenses en matériels et formations professionnelles. La capacité financière est donc fortement liée au dimensionnement des ressources humaines, tant en termes de types de profil que de nombre de personnels.

Basée sur la vision de Mac Leamy, l'hypothèse majeure ici est que le BIM et la rénovation provoquent une perturbation des flux de travail et des flux financiers courants de maintenance au sein du modèle, dans les processus opérationnels notamment. La satisfaction de besoins extraordinaires (en ressources

financières et humaines, en nombre et compétences spécifiques) dus à des opérations extraordinaires permet la régulation du système modélisé.

Les liens RH-CF servent donc à traiter plusieurs aspects de notre problématique. On s'intéresse à la façon dont l'organisation absorbe les surplus demandés en distinguant dans le prochain chapitre les temps passés internalisés et les dépenses d'externalisation. En lien direct avec la question précédente, ces connexions vont permettre d'observer les conséquences de la non-qualité, dont la résorption est présentée de façon récurrente dans la littérature comme étant l'un des avantages intangibles les plus attendus et mesurés. Grâce à la modélisation de ces dynamiques antagonistes, nous serons en mesure de qualifier l'impact du BIM sur les coûts intangibles de non-qualité générés par la RH dans différentes configurations de la trajectoire numergétique de l'organisation.

[ME] CF↔EP

Le niveau MI explicitait la contrainte de capacité financière qui s'applique sur les processus décisionnels en ME. Celle-ci peut modifier la décision d'amélioration énergétique sous plusieurs aspects: nombre maximal de rénovations par an, intensité des rénovations, éventuel ajournement des opérations. Ici, cela traduit davantage la recherche d'un rythme de rénovation qui soit acceptable tant du point de vue de la réglementation que de la pression financière qui s'exerce sur le modèle. Outre la caractérisation de la contrainte de faisabilité financière et de son impact sur le déclenchement des opérations, le modèle a vocation ici à explorer les conditions dans lesquelles l'organisation peut espérer atteindre la rentabilité des investissements en rénovation. En MA, le développement de ces axes devrait permettre de d'analyser les conditions d'une massification des opérations de renouvellement urbain.

[ME] EP↔RH

Les opérations de rénovation vont mobiliser des ressources humaines, potentiellement jusqu'à saturer les workflows internes et forcer l'externalisation de certaines tâches. *A fortiori*, la rénovation BIM-centrée demande de cumuler les temps passés en gestion de données (dataflows) et les temps de travaux (workflows). Mais qu'en est-il de l'amélioration des délais de réalisation, présentée comme un atout fort de la transition numérique ? La compétence BIM de la RH est ici au cœur d'un double enjeu. En premier lieu la compétence opérationnelle, en PE comme en DN, est en relation directe avec l'efficacité des travaux énergétiques réalisés et la qualité des connaissances contenues dans le SI. Par ailleurs, pour que l'opération numergétique se révèle avantageuse en termes de qualité et de délais, la capacité de l'organisation à améliorer ses processus grâce au BIM doit aussi permettre de compenser les temps supplémentaires induits par les dataflows.

[ME] RH↔DN

L'adoption du BIM et la numérisation du parc génèrent de nouvelles tâches (comme la maintenance des modèles BIM) et entraînent la modification des flux de travail (détail au chapitre 4) et de la ressource humaine nécessaire à leur réalisation. Par ailleurs le BIM a pour caractéristique de transformer les temporalités traditionnellement associées aux opérations de construction ce qui sur la courbe Mac Leamy correspond au décalage de la charge de travail dans le temps. Notre modèle, au pas de temps annuel, n'a pas vocation à analyser finement le déplacement des volumes de travail à l'échelle d'une opération unique, mais va permettre d'étudier, dans une vision moyen-long terme à l'échelle du cycle de vie des objets techniques, l'équilibre des charges de travail et leur répartition dans le temps, en présupposant un comportement de type goal-seeking, oscillation qui tend vers un objectif stabilisateur. En rapprochant Mac Leamy de la notion de productivité, on émet l'hypothèse (argumentée en chapitre 3) que les facteurs d'impact à l'origine du déplacement des flux de travail sont essentiellement liés à la compétence des opérateurs. De cette relation entre MERH et MEDN, on souhaite faire émerger les enjeux majeurs de la qualification et de l'expérience des personnels dans la création en interne d'un terreau fertile à l'apprentissage organisationnel, considéré dans nos travaux comme l'aspect fondamental à valoriser dans la mise en œuvre de processus collaboratifs, dans une vision multi-agents (pouvoir observer l'impact de différents niveaux de qualification, expérience, compétence).

En outre, la capacité (en termes de RH) de l'organisation à opérer les requêtes numergétiques est directement diminuée des temps dégagés pour la formation des effectifs internes. Le dimensionnement

des équipes, l'allocation du temps de travail et la stratégie de formation des personnels seront directement impactés par la trajectoire numergétique de l'organisation. En contrepartie de l'implication humaine demandée par le BIM, l'un des bénéfices à dégager de son utilisation est la résorption de la non-qualité, elle-même à l'origine d'une possible diminution des délais d'une opération dans nombre de cas (Barlish and Sullivan, 2012). Nos travaux supposent que la pleine maturité technologique du BIM n'est pas encore atteinte en 2018, date de démarrage de la période de simulation. On émet l'hypothèse que le rythme et l'horizon de maturité du BIM ont un impact fort sur le niveau de qualification des personnels : si les effectifs sont formés à un certain niveau de qualification à un temps t , les développements technologiques du BIM à $t+1$ rendent la connaissance accumulée incomplète⁴⁵. La modélisation systémique doit ainsi nous permettre d'évaluer l'effet de la stratégie BIM déployée sur les dynamiques de non-qualité des processus opérationnels.

[ME] DN↔CF

C'est ici que prend place le couple de critères décisionnels (évaluation & ordre de démarrage des travaux numergétiques). La faisabilité financière est obtenue par l'aboutissement du processus décisionnel de sélection des opérations à réaliser. Le modèle confronte la capacité financière de l'organisation (flux de trésorerie cumulés) aux frais annuels de l'entreprise auxquels s'ajoute le montant des opérations retenues. Selon que les moyens disponibles sont suffisants ou non (choix du gestionnaire), le système décisionnel valide ou ajourne la demande d'opération.

Les coûts traités en ME concernent les postes suivants : coûts de fonctionnement, investissements numergétiques, surcoûts de non-qualité. On évalue ici l'impact de la cadence et de l'intensité des investissements numergétiques sur ces coûts, et sur la contrainte de capacité financière qui s'exerce tout au long de l'exploitation. Tel qu'abordé ci-dessus, nous exploiterons également l'hypothèse selon laquelle le BIM impacte de manière inégale les différents postes de dépenses. C'est ici que s'effectue le bilan économique de la trajectoire numergétique mise en place par l'organisation et que nous pourrons, comme pour la RH, mettre en évidence le déplacement temporel des flux financiers induits par la transition numérique.

1.2. Paramètres de configuration du niveau décisionnel

Ce niveau s'intéresse à l'échelle décisionnelle, la manière dont celle-ci exploite l'information de MI pour prendre des décisions, puis l'impact de ces décisions sur la performance de l'organisation mise en regard de celle du parc. C'est dans la sphère décisionnelle que sont modélisés :

- La stratégie BIM,
- La stratégie de rénovation.

1.2.1. La stratégie BIM

Le modèle envisage l'adoption et le déploiement stratégiques du BIM sous quatre angles :

LOD : Level of Development

Entrée du modèle, le LOD nous servira de référence en termes de contenus de données, renvoyant à la notion de disponibilité des données. On considérera en effet que plus un LOD est élevé, plus il contient d'information. La fiabilité des données est quant à elle présentée ci-après.

Une de nos hypothèses majeures est que cette information, et la façon dont celle-ci est organisée et gérée par le décideur-gestionnaire, est déterminante dans la création de la connaissance technique et l'apprentissage organisationnel. Comme nous l'avons présenté dans les sections précédentes à travers la littérature technique et scientifique, cet apprentissage est l'une des clés de la pérennisation des outils numériques et des données de l'objet construit et géré.

Aussi l'un des objectifs poursuivis par le niveau ME est de recenser et quantifier les impacts que peut avoir le LOD sur l'amélioration de la performance énergétique, sous modification/perturbation des flux

⁴⁵ Le niveau de qualification BIM n'a pas nécessairement diminué, voire il a été augmenté par le processus d'auto-formation (détail en chapitre 8). Mais l'évolution de l'environnement rend cette connaissance incomplète.

de travail et des objectifs de qualité/disponibilité des données numériques.

T0 : date de déploiement du BIM

Le BIM n'est pour l'heure pas rendu obligatoire par la réglementation. S'il le devient, la planification de sa mise en œuvre, au même titre que les rénovations, devra être intégrée au plan pluriannuel de travaux. On émet l'hypothèse que la succession rapide du développement des fonctionnalités du BIM et des outils associés (composant l'environnement numérique de travail tel que présenté au chapitre 1) a un impact significatif sur les dynamiques de la compétence BIM interne et de la transition numergétique. Il s'agit donc ici d'approfondir les résultats présentés par la littérature et leur sensibilité à une telle date de déploiement dans un environnement en évolution.

MAT : rythme de maturation de l'outil technologique BIM

Les caractéristiques de cette évolution sont incertaines. Mais il est fort probable qu'elle aura un impact sur les plus-values et autres externalités suggérées. L'horizon de pleine maturité technique et technologique du BIM est difficile à préciser, tout comme le rythme auquel les développements seront pérennisés. Si tel n'est pas l'objet de la présente étude, le modèle n'en intègre pas moins ici le potentiel de développements ultérieurs sur des questions juridiques ou de compétitivité. On questionne ici la façon dont un certain nombre de facteurs externes peuvent suggérer qu'il existe de meilleurs moments que d'autres pour déployer le BIM.

FORM : intégrer les formations dans le processus de déploiement

La formation au BIM et sa mise à jour constituent un préalable considéré par le secteur comme indispensable à la bonne mise en œuvre de l'outil. Or cette question ne semble pas avoir été analysée. Quand on les interroge, les experts semblent conscients que différents niveaux de LOD, activités et autres niveau de compétence interne préalable impliquent différents niveaux de formation. Cela transparaît clairement dans les offres de formations BIM proposées par les acteurs de la formation professionnelle : certifiantes, spécialisées, etc... Le choix de former ou non les effectifs, le choix d'orientation des contenus ou de la prise en compte des recommandations ou encore le choix des échéances relèvent de la politique/stratégie interne. Cette partie du modèle permet d'initier l'examen de la gestion de la compétence BIM comme ressource interne à part entière.

1.2.2. La stratégie de rénovation

RT : réglementation thermique des bâtiments pour l'existant

La performance énergétique est sujette à de nombreux facteurs que nous avons eu l'occasion d'évoquer en chapitre 4. Le modèle considère que la décision de rénover le mix énergétique d'un bâtiment revient exclusivement au décideur et à sa volonté de décarboner le parc ou d'intégrer les ENR moyennant un éventuel surcoût des rénovations. On s'intéresse ici aux conséquences financières de telles décisions et l'intérêt énergétique de tels efforts supplémentaires.

DER : dérive incertaine du prix des énergies

Comme MAT (cf. ci-dessus) il s'agit d'une variable externe de contexte. Les problématiques d'efficacité énergétique et de délaissement des énergies fossiles conduisent à s'interroger sur le rôle dans le processus de décision des prix respectifs des énergies fossiles et renouvelables et de leur évolution. Sans développer la question, très actuelle et polémique, du coût réel des différentes énergies, notamment pour la collectivité nationale⁴⁶, il s'agit ici de voir si ces prix et leur dérive constituent un levier suffisant pour encourager les rénovations.

⁴⁶https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/fr#Les_prix_de_l_electricite_pour_les_consummateurs_régionaux (article d'Eurostat sur l'évolution des prix de l'électricité).
https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/les-couts-lisses-de-l-electricite-774441.html?amp=1&twitter_impression=true (dans La Tribune, sur les coûts lisses de l'électricité).

Les sections suivantes présentent en détail les quatre modules qui composent le niveau ME : MEPE, MECF, MEDN et MERH.

2. MEPE – Performance Énergétique

2.1. Diagramme causal synthétique (MEPE)

Le sous-modèle MEPE traduit les objectifs stratégiques de performance énergétique du décideur, dans le respect - *a minima* - des objectifs réglementaires en vigueur. Pour rappel, c'est sur la base de cette information que le module MIPE génère les demandes annuelles de rénovation pour les bâtiments identifiés comme non-conformes aux réglementations. Ces requêtes, transmises au module MEPE, sont alors soumises au processus décisionnel de priorisation/sélection des opérations de rénovation à réaliser sur le parc avant d'être rejetées ou approuvées. L'approbation d'une demande génère une information décisionnelle de commande de l'opération de rénovation.



Figure 37. Diagramme causal MEPE.

On différenciera les notions de « *commandes*⁴⁷ » de rénovation et d'« *ordres*⁴⁸ » de rénovation : les commandes sont formulées par MEPE, évaluées et sélectionnées en fonction de leur intérêt / plus-value et au regard de la productivité. Les ordres sont générés par MECF après vérification de la faisabilité financière des opérations. C'est bien MECF qui déclenche les missions annuelles à réaliser sur le parc. MEPE a pour seul objectif de maximiser l'impact prévisible des rénovations dans la limite des contraintes imposées. Il est à noter que les opérations d'entretien-maintenance ne sont pas soumises à la contrainte de disponibilité des ressources. Ces opérations sont forcées même en cas de fonds insuffisants, afin d'assurer ce qu'on appellera en MESO un service minimal (*minimal service*), même si cela doit générer un bilan financier négatif. Ce n'est pas le cas des rénovations, qui seront annulées si la faisabilité financière des opérations commandées n'est pas vérifiée.

2.2. Diagramme de flux (MEPE)

Pour rappel, le sous-modèle MEPE, présenté en Figure 38 ci-dessous, a une fonction principale de comparateur. Il analyse les requêtes de rénovation produites par MIPE au regard de l'objectif stratégique de maximisation des gains de performance énergétique et de leur rentabilité potentielle. Le sous-modèle MIPE a vocation à produire :

- Une estimation des investissements en rénovation pour toutes les requêtes $Restimate(b,t)$,
- Une estimation des économies potentielles sur la facture énergétique des bâtiments. Comme le gestionnaire n'en a pas la charge, nous l'avons considérée comme un élément décisionnel de priorisation des opérations (en MEPE) : $Ebill\ potential\ savings(b,t)$. Cela n'introduit pas de biais puisqu'*a priori* les bâtiments les plus énergivores resteront prioritaires avec ce modèle.

⁴⁷ « *Orders* » en anglais.

⁴⁸ « *Commands* » en anglais. Dans le modèle et pour limiter la confusion autour de ces termes, la variable *start task* sera employée pour le déclenchement des opérations. Le terme *order* est maintenu pour les commandes.

- La priorisation, qui consiste à sélectionner les opérations qui proposent les économies les plus importantes : $R\ order(b,t)$ dans la limite de $R\ supply$ nombre de rénovations annuelles.

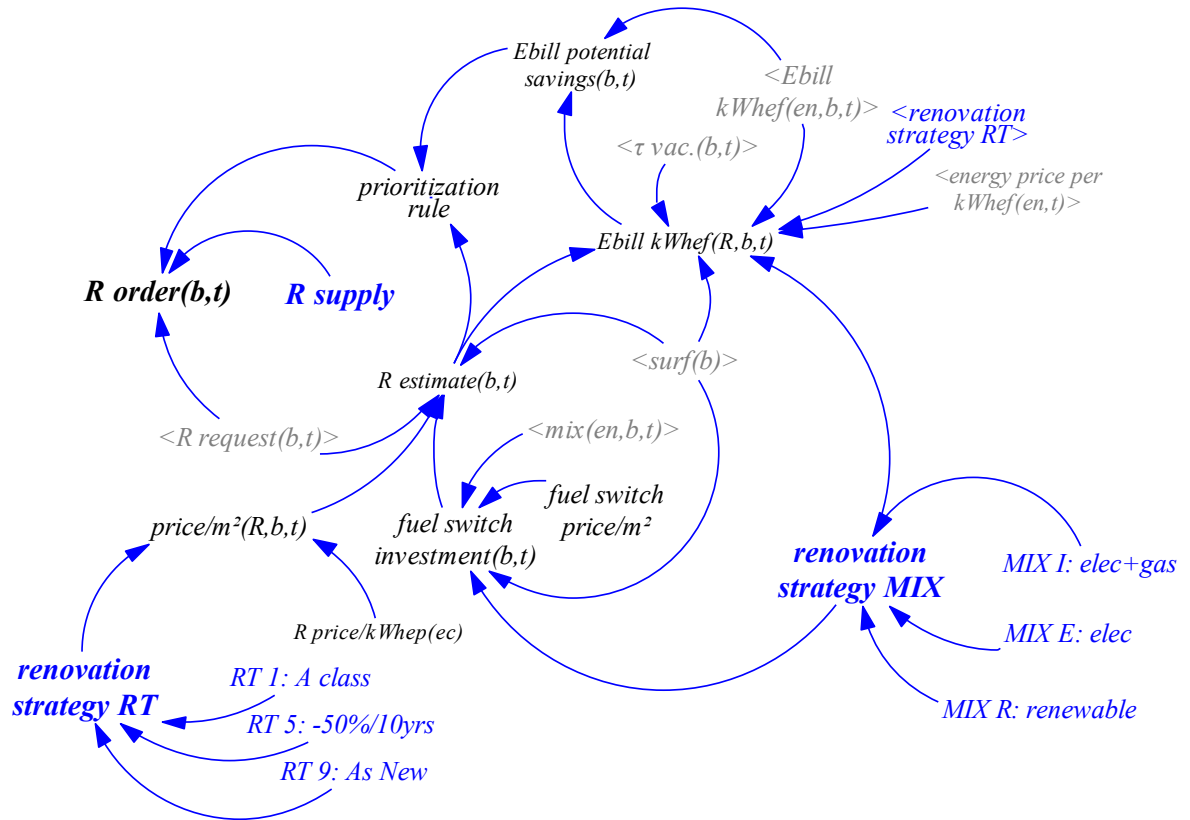


Figure 38. Diagramme de flux MEPE.

Table 21. Nomenclature du diagramme de flux MIPE.

$R\ estimate(b,t)$

Montant prévisible, en euros, des travaux de rénovation sollicités sur le bâtiment b au temps t . $R\ estimate(b,t)$ se compose d'un montant dédié à l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment b au temps t $price/m^2(m=R,b,t)$ (lié à la stratégie de rénovation RT , voir ci-après et chapitre 7) et d'un montant dédié à la décarbonation du parc par la rénovation du mix énergétique $fuel\ switch\ investment(b,t)$ du bâtiment b au temps t .

$price/m^2(R,b,t) / R\ price/kWh_{ef}(ec)$

Coût unitaire, en €/m², des travaux de rénovation sollicités sur le bâtiment b au temps t . Ce coût unitaire est calculé sur la base des gains en kWh_{ef} prévisibles au regard de la stratégie de rénovation $renovation\ strategy\ RT$ engagée sur le parc, et s'appuie sur les montants suggérés par les travaux du CIRED.

$fuel\ switch\ investment(b,t) / fuel\ switch\ price/m^2$

Montant prévisible, en euros, des travaux sollicités sur le bâtiment b au temps t pour la rénovation de son mix énergétique. $fuel\ switch\ investment(b,t)$ s'appuie sur les coûts unitaires de $fuel\ switch\ price/m^2$ proposés par (Branger, 2015), en €/m² pour lier le montant des travaux au mix énergétique retenu par la stratégie de rénovation $renovation\ strategy\ MIX$.

$Ebill\ kWh_{ef}(R,b,t) / Ebill\ potential\ savings(b,t)$

$Ebill\ kWh_{ef}(R,b,t)$ est la facture énergétique annuelle en énergie finale prévisible du bâtiment b au temps t après rénovation. Confrontée à la facture énergétique courante, elle est utile au calcul de $Ebill\ potential\ savings(b,t)$ économies potentielles en énergie finale à réaliser après rénovation du bâtiment b au temps t , lesquelles alimenteront le processus de sélection des requêtes de rénovation $R\ request(b,t)$ à privilégier.

$prioritization\ rule / R\ supply$

$prioritization\ rule$ est la règle de priorisation utilisée pour classer par ordre d'intérêt les requêtes de rénovation formulées au temps t pour les bâtiments b . Les opérations pour lesquelles $Ebill\ potential\ savings(b,t)$ est le plus élevé sont favorisées. $R\ supply$ est le nombre de rénovations sélectionnées annuellement par l'organisation pour réalisation des travaux. Dans des développements ultérieurs (chapitre 8) via un niveau MACRO, tester la sensibilité du modèle à ce paramètre permettrait d'étudier les leviers de massification des opérations de rénovation dans un système multi-agents.

$R\ order(b,t)$

Abandon ou confirmation de la requête de rénovation pour le bâtiment b au temps t , dans la limite de $R\ supply$ nombre de rénovations annuelles et d'après le tri réalisé sur un critère d'économies potentielles en énergie finale $Ebill\ potential\ savings(b,t)$. Déclenche l'analyse de faisabilité financière en MECF pour les opérations demandées, laquelle décidera du statut final de l'« ordre de rénover » : maintenu, ou avorté par manque de ressources financières.

2.2.1. Coût des rénovations

Pour assurer sa fonction de comparaison et de classement (détail en section suivante), le sous-modèle MEPE s'appuie sur une estimation des investissements financiers prévisibles associés à chacune des requêtes produites par MIPE. Le coût des rénovations se compose dans MACARON d'une part du coût de la rénovation thermique des bâtiments et d'autre part du coût de la rénovation des mix énergétiques des bâtiments.

Le coût de la rénovation thermique est calculé sur la base de l'intensité des rénovations, qui associe l'évaluation du nombre de sauts de classe énergétique et du volume des consommations à résorber, lesquels on le rappelle sont dictés par les objectifs stratégiques du décideur et des politiques publiques. Ce coût varie en fonction :

- du nombre de sauts de classe énergétique prévisible
- des classes énergétiques de départ (avant rénovation) et d'arrivée (après rénovation)
- du volume total de kWh_{ep} à résorber lors des opérations.

Le delta de performance énergétique à résorber pour chaque requête se mesure en kWh_{ep}/(m².an) (performance énergétique annuelle par unité de surface de bâtiment type DPE et CPE) par comparaison du niveau de performance attendu RT (stratégie énergétique du décideur) et du niveau de performance réel du bâtiment concerné $E_{const}/m^2(b,t)$ pour déterminer le nombre de kWh_{ep} par m² de parc à résorber. Parallèlement, les classes énergétiques de départ (avant rénovation) et d'arrivée (après rénovation) permettent de déterminer le nombre de sauts de classe et leur situation dans la matrice de coûts présentée en Table 24. Si la classe d'arrivée visée par RT est de performance inférieure à la classe C, on utilise la même base de coûts qu'en classe d'arrivée C.

Table 22. Coût des rénovations [€/m²] par saut de classe (Branger, 2015)

		Classe d'arrivée		
		A	B	C
Classe de départ	A	0	0	0
	B	350	0	0
	C	590	290	0
	D	780	480	230
	E	920	620	370
	F	1010	710	460
	G	1050	750	500

Table 23. ΔkWh_{ep} par saut de classe

		Classe d'arrivée		
		A	B	C
Classe de départ	A	0	0	0
	B	40	0	0
	C	100	60	0
	D	180	140	80
	E	280	240	180
	F	400	360	300
	G	400	360	300

Table 24. Coût des rénovations [€/m²] par kWh_{ep} selon saut de classe

		Classe d'arrivée		
		A	B	C
Classe de départ	A	8,75	0,00	0,00
	B	8,75	4,83	0,00
	C	5,90	4,83	2,88
	D	4,33	3,43	2,88
	E	3,29	2,58	2,06
	F	2,53	1,97	1,53
	G	2,63	2,08	1,67

Éq. 24

$$price/m^2(R, b, t) = R \text{ price}/kWh_{ep}(ec) \times (E_{cons}/m^2(b, t) - renovation \text{ strategy } RT)$$

Où :

$price/m^2(R, b, t)$ est le coût unitaire, en euro/m² de surface, des travaux de rénovation sollicités sur le bâtiment b au temps t

$price/kWh_{ep}(ec, b, t)$ est le coût unitaire, en euro/kWh_{ep}, des travaux de rénovation sollicités sur le bâtiment b en fonction de sa classe énergétique ec au temps t et de la classe énergétique ec visée à l'instant t+1

$E_{cons}/m^2(b, t)$ est la consommation énergétique unitaire par m² du bâtiment b au pas de temps t, en kWh_{ep}/(m².an)

$renovation \text{ strategy } RT$ est la consommation énergétique unitaire par m² visée pour le bâtiment b au pas de temps t, en kWh_{ep}/(m².an)

En revanche la rénovation des mix énergétiques n'est imposée par aucune réglementation et relève entièrement du choix du décideur dans sa stratégie de décarbonation du parc. Ces investissements sont ponctuels (et ces travaux n'apparaissent qu'une fois sur le cycle de vie d'un bâtiment) et leur prix est forfaitaire tel que présenté en Table 25 page suivante.

Table 25. Coûts de rénovation des mix énergétiques [€/m²]
adaptés de (Branger, 2015).

	€/m² rénové	MIX d'arrivée		
		Électricité	Gaz	Électricité verte
MIX de départ	Électricité	0	70	55
	Gaz	55	0	50
	Électricité verte	55	50	0

Lorsqu'elles sont déclenchées en MEPE, les requêtes de rénovation des mix énergétiques s'ajoutent aux requêtes de rénovation thermique approuvées par la suite.

Éq. 25

$$R\ estimate(b, t) = R\ request(b, t) \times ((surf(b) \times price/m^2(R, b, t)) + fuel\ switch\ investment(b, t))$$

Où :

$R\ estimate(b, t)$	est le montant prévisible, en euros, des travaux de rénovation thermique sollicités sur le bâtiment b au temps t
$R\ request(b, t)$	est la requête de rénovation pour le bâtiment au b au pas de temps t (0 ou 1)
$surf(b)$	est la surface du bâtiment b
$price/m^2(R, b, t)$	est le coût unitaire, en euro/m² de surface, des travaux de rénovation sollicités sur le bâtiment b au temps t
$fuel\ switch\ investment(b, t)$	est le montant prévisible, en euros, des travaux sollicités sur le bâtiment b au temps t pour la rénovation de son mix énergétique

2.2.2. Priorisation des commandes de rénovation

On prédit sur la base des objectifs de rénovation envisagés (RT et MIX) le montant de la facture énergétique du bâtiment rénové $Ebill(R, b, t)$. Ce montant est confronté à celui de la facture énergétique réelle du bâtiment $Ebill(b, t)$ pour déterminer le montant des économies financières potentielles à réaliser par les usagers (NANO) sur leurs dépenses énergétiques. Le rapport du montant des investissements en rénovation prévisibles $R\ estimate(b, t)$ et du montant des économies sur facture $Ebill\ potential\ savings(b, t)$ fait émerger la période de récupération indicative associée à chaque investissement potentiel en rénovation. La priorisation consiste à ne retenir que les opérations qui présentent les meilleurs rendements c'est-à-dire les périodes de retour sur investissement les plus courtes.

Notre choix de représenter le processus de sélection des rénovations à déclencher de cette manière est motivé par plusieurs arguments. En premier lieu, les motivations du décideur ne sont probablement pas purement énergétiques. Un raisonnement qui n'intégrerait ici que l'écart en kWh ou en euro de facture énergétique ignorerait de fait d'autres motivations telles que la valorisation du parc. Doivent donc être intégrés au raisonnement des considérations financières de comparaison des montants d'investissements et de rendement de ces investissements.

Par ailleurs, le fait de baser la priorisation sur la facture énergétique introduit nécessairement dans le processus décisionnel la prise en compte du facteur évolution du prix des énergies, intéressant dans une stratégie pluriannuelle et *a fortiori* dans notre périmètre d'étude et sur la période considérée.

Enfin cela nous permet de rappeler ici que les missions du gestionnaire ont bien sûr vocation à valoriser le parc, mais aussi à assurer un service. La stratégie énergétique du gestionnaire ne saurait être totalement décorrélée des intérêts directs des usagers, que nous avons ici choisi de représenter dans le processus de décision par le critère de minimisation de la facture qui leur incombe (et qui pourraient être développés selon des considérations sociales ou sociétales).

3. MECF – Capacité Financière

3.1. Diagramme causal synthétique (MECF)

Le sous-modèle MECF formalise la fluctuation de la trésorerie disponible et la contrainte de disponibilité des ressources financières qui s'applique à l'échelle du parc pour assurer les dépenses de fonctionnement courantes et les investissements en gestion de patrimoine. Il fait converger les requêtes de rénovation et de numérisation des bâtiments, respectivement approuvées en MEPE et commandées en MEDN, et évalue la faisabilité financière des travaux demandés au regard des ressources financières disponibles (Figure 39 ci-dessous). C'est dans ce sous-modèle que sont déclenchés les ordres et les investissements numergétiques dans le cas où leur faisabilité financière est assurée. Dans le cas contraire MECF déclenche les opérations de service minimal (entretien, maintenance et fonctionnement courants en période normale) lesquels rappelons-le ne peuvent être annulés ou reportés. On se place dans un cas de maintenance parfaite n'autorisant aucun manquement même par défaut de moyens financiers.

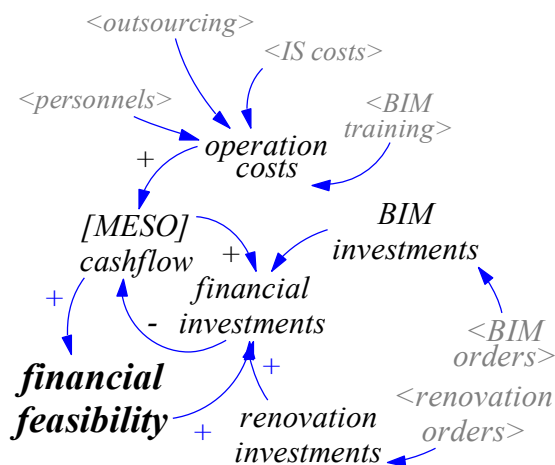


Figure 39. Diagramme causal MECF.

L'objectif de ce sous-modèle est de caractériser l'ampleur des impacts respectifs, puis combinés, de la stratégie énergétique et de la stratégie numérique du gestionnaire sur l'évolution de la capacité financière de l'organisation, le report potentiel d'opérations sur le parc et l'efficacité économique et énergétique des investissements ainsi déployés. Des investissements plus importants vont évidemment contraindre davantage la capacité d'investissement de l'organisation. On souhaite explorer ici la dynamique résultant de la rencontre des surcoûts générés par un effort numergétique important (voire proactif) et des gains tangibles et intangibles réalisables (économies sur certains postes de dépenses d'exploitation, diminution des temps passés...), dont on peut supposer qu'ils sont d'autant plus importants que l'engagement financier l'est aussi. Au global, les stratégies énergétique, numérique et numergétique représentent-elles une opportunité de valoriser le parc ou une menace pour l'organisation en termes de risques financiers ?

3.2. Diagramme de flux (MECF)

Le sous-modèle MECF, présenté en Figure 40 page suivante, a dans MACARON une fonction principale de comparateur. Il combine les tâches de service minimal et les requêtes numergétiques dans l'analyse de la faisabilité annuelle des opérations commandées : pour chaque bâtiment il fait aboutir le processus initié par MEPE vers le déclenchement d'une opération ou son annulation selon que le coût calculé par le modèle des missions est en adéquation avec la capacité de l'organisation. Le sous-modèle MECF a vocation à produire :

- Un ordre de mission qui combine les différentes tâches à réaliser annuellement sur le parc : $start\ task(m,b,t)$,
- Le déclenchement annuel des coûts associés aux missions numergétiques retenues et des dépenses courantes : $Bstock\ expenses(t)$,

- Le flux de trésorerie annuel, la différence des bénéfices générés par l'activité de gestion locative (la contribution produite par le niveau MICRO) et des dépenses pour la gestion de parc centralisées en MECF. Cumulé dans le temps sous la forme d'un stock, il représente la capacité financière du gestionnaire : *MESO Cash Flow(t)*.

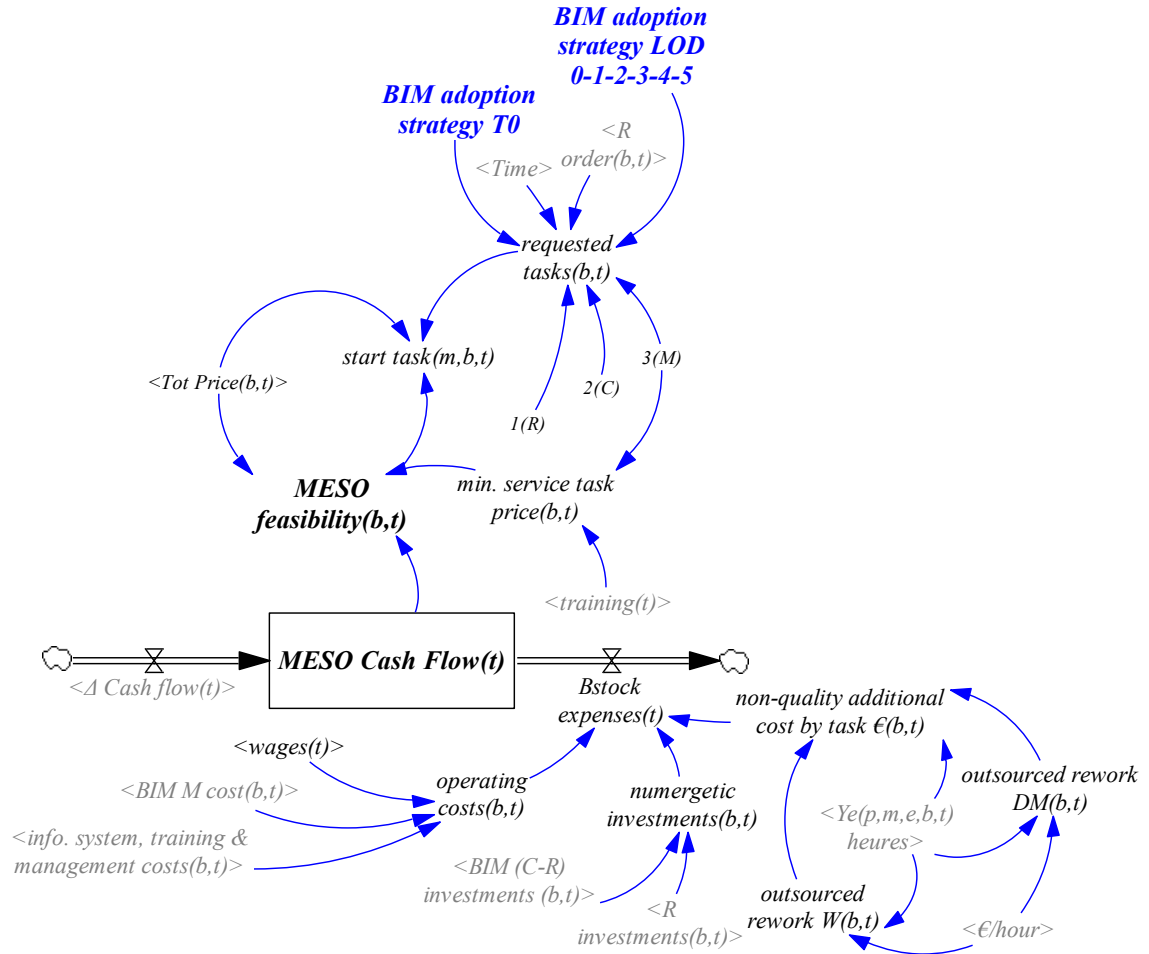


Figure 40. Diagramme de flux MECF.

Table 26. Nomenclature du diagramme de flux MICEF.

MESO Cash Flow(t)

Capacité financière de l'organisation au temps t , en euros. Bilan cumulé à l'instant t des bénéfices locatifs $\Delta \text{Cash Flow}(t)$ (excédents de trésorerie générés par la location du bâtiment b au temps t) et les dépenses *Bstock expenses(t)* (somme annuelle des coûts de fonctionnement *operating costs(b,t)* et des investissements numergétiques *numergetic investments(b,t)* associés au bâtiment b au temps t , et accessoirement leur coût de non-qualité relatif).

operating costs(b,t) / *numergetic investments(b,t)* / *non-quality additional cost by task (b,t)*

La variable *operating costs(b,t)* représente les coûts de fonctionnement engendrés par l'activité d'exploitation du bâtiment b au temps t . Ceux-ci comprennent les salaires des personnels *wages(t)*, les coûts de maintenance des modèles BIM *BIM M cost(b,t)*, ainsi que d'autres coûts de gestion tels que les frais de maintenance du système d'information et les frais de formation *info.system, training & management costs(b,t)*.

La variable *numergetic investments(b,t)* est le montant, à l'instant t , des investissements numergétiques réalisés pour le bâtiment b . Elle se compose des investissements de construction-rénovation des modèles de données et du système d'exploitation BIM *BIM (CR) investments(b,t)* et des investissements de rénovations *R investments(b,t)*.

La variable *non-quality additional cost by task (b,t)* est le surcoût de non-qualité généré par la réalisation des opérations numergétiques associées au bâtiment b à l'instant t . L'ensemble forme les dépenses courantes de gestion à l'échelle du parc *Bstock expenses(t)*.

requested tasks(b,t) (assimilated scenario(b,t))

requested tasks(b,t) est la combinaison de missions m (M,MM,R,MR,MC,O) demandées à l'instant t pour le bâtiment b par la stratégie numergétique du décideur, laquelle associe i) la sélection de bâtiments à rénover *R orders(b,t)*, ii) la date de déploiement du BIM *T0* et iii) l'intensité de numérisation *LOD*. Le modèle comprend trois combinaisons de tâches possibles telles que présentées en Table 27 ci-après : *1(R)*, *2(C)*, *3(M)*.

Tot Price(b,t) / *MESO feasibility(b,t)* / *min. service task price(b,t)*

Le montant total, en euros, des travaux annuels requis pour le bâtiment b au temps t *Tot Price(b,t)* est confronté à la capacité financière de l'organisation *MESO Cash Flow(t)* pour en déterminer la faisabilité financière *MESO feasibility(b,t)*. Si des opérations particulières sont

demandées (*assimilated scenario* (t) = 1(R) ou 2(C)) et que leur montant dépasse celui des ressources financières disponibles, les opérations sont reportées et remplacées par une combinaison de missions m de type 3(M) (voir Table 27 ci-après). Le diagramme de flux et les hypothèses de quantification dynamique de la variable Tot Price(b,t) en fonction des différentes combinaisons sont présentés en annexe 3.

3.2.1. Capacité financière de l'organisation

La capacité financière de l'organisation à un instant t correspond au montant rendu annuellement disponible pour les dépenses courantes de gestion-exploitation et les investissements numergétiques. Elle cumule pour cela les flux de trésorerie de gestion-exploitation des pas de temps précédents, selon l'équation suivante :

Éq. 26

$$MESO\ Cash\ Flow(t) = \Delta\ Cash\ flow(t - 1) - Bstock\ expenses(t - 1)$$

Où :

<i>MESO Cash Flow(t)</i>	est le montant de la capacité financière de l'organisation au temps t, en euros
$\Delta Cash\ flow(t)$	est le montant de la contribution financière dégagé au temps t pour la gestion des actifs du parc de logements, en euros
<i>Bstock expenses(t)</i>	est le montant au temps t des dépenses courantes de gestion à l'échelle du parc, en euros

Éq. 27

$$Bstock\ expenses(t) = operating\ costs(b,t) + numergetic\ investments(b,t) + non - quality\ additional\ cost\ by\ task(m,b,t)$$

Où :

<i>Bstock expenses(t)</i>	est le montant au temps t des dépenses courantes de gestion à l'échelle du parc, en euros
<i>operating costs(b,t)</i>	est le montant des coûts de fonctionnement engendrés par l'activité d'exploitation du bâtiment b au temps t
<i>numergetic investments(b,t)</i>	est le montant, à l'instant t, des investissements numergétiques réalisés pour le bâtiment b
<i>non-quality additional cost by task(m,b,t)</i>	est le surcoût de non-qualité généré par la réalisation des opérations numergétiques associées au bâtiment b à l'instant t

$\Delta\ Cash\ flow(t)$ est le montant des bénéfices dégagé annuellement par le module MICF. Pour rappel, il provient de la différence des produits locatifs et des dépenses d'exploitation-maintenance des bâtiments du parc. Aucune autre source de revenus que ces contributions financières annuelles n'alimente la capacité financière *MESO Cash Flow(t)* de l'organisation en MECF. C'est donc dans ce sous-modèle qu'on observera les conséquences d'une divergence entre produits locatifs et dépenses de maintenance, dont on pressent que l'impact pourrait être significatif sur le rythme et l'ampleur des investissements numergétiques du gestionnaire en cas de déséquilibre financier trop important.

Les coûts de fonctionnement *operating costs(b,t)* regroupent :

- les salaires de l'équipe de travail *wages(t)*,
- les coûts de gestion de l'équipe de travail lesquels comprennent les frais de management, les coûts de formation et les coûts de maintenance du système d'information *info.system, training & management costs(b,t)*
- les coûts de maintenance des modèles de données BIM, *BIM M costs(b,t)*.

Éq. 28

$$\begin{aligned} \text{operating costs}(b, t) \\ = \text{wages}(t) \div Nb + \text{info.system, training \& management costs}(b, t) \\ + \text{BIM M cost}(b, t) \end{aligned}$$

Où :

<i>operating costs</i> (<i>b, t</i>)	est le montant des coûts de fonctionnement engendrés par l'activité d'exploitation du bâtiment <i>b</i> au temps <i>t</i>
<i>wages</i> (<i>t</i>)	est le montant, à l'instant <i>t</i> , des salaires des personnels
<i>Nb</i>	est le nombre de bâtiments <i>b</i> du parc
<i>info.system, training \& management costs</i> (<i>b, t</i>)	est le montant des autres coûts de gestion tels que les frais de maintenance du système d'information et les frais de formation
<i>BIM M cost</i> (<i>b, t</i>)	est le montant des coûts de maintenance des modèles BIM

Les investissements numergétiques sont l'addition des investissements pour la construction des modèles BIM, et leur rénovation *BIM (C-R) investments*(*b, t*) et des investissements en rénovation *R investments*(*b, t*). Le détail des équations et du calibrage de MACARON concernant les montants et la structure des prix de tâches est présenté en annexe 3.

Certaines des dépenses de l'organisation sont associées dans MACARON à des flux de travail. C'est le cas en MECF des dépenses *BIM M costs*(*b, t*), *BIM (C-R) investments*(*b, t*), *R investments*(*b, t*) et des *expenditures*(*b, t*) en MICE. Or ces flux de travail, nous l'avons montré en MIRH et MIDN, sont des processus imparfaits qui génèrent dans notre modèle des surcoûts de non-qualité *non-quality additional costs by task*(*m, b, t*) associés à l'externalisation supplémentaire (non prévue dans l'estimation initiale du fait du caractère imprévisible des dépenses de non-qualité) de tâches que l'organisation ne peut assumer en interne par manque de moyens humains. Cette spécificité du modèle est détaillée en MIRH, MERH et MIDN.

Là encore pour MACARON la notion de qualité est centrale dans la performance économique de la gestion stratégique du parc, puisqu'ici on considère que la non-qualité se paye au prix fort d'un effet direct et tangible de la capacité financière globale de l'organisation. On modélise ici l'intérêt du gestionnaire à investir dans la qualité de ses processus. On ne peut à proprement parler ici d'incitation. tel aurait pu être (ou pourrait être) le cas si les coûts de non-qualité présentaient une boucle de rétroaction vers les processus décisionnels. On cherchera ici essentiellement à mesurer l'ampleur de la contrainte financière qui s'applique sur les investissements numergétiques en fonction de différents scénarios d'investissements stratégiques pour la gestion du parc (par exemple, avec et sans BIM).

3.2.2. Évaluation de la faisabilité financière des investissements

Dans la section précédente, nous avons explicité la notion de capacité financière de l'organisation, et la manière dont celle-ci évolue au cours du temps en fonction des contraintes de gestion locative du décideur et de sa politique d'investissement numergétique. La capacité financière de l'organisation, soit les ressources financières dont elle dispose à un instant *t*, limite de fait les dépenses (d'investissement, en particulier) réalisables annuellement par le gestionnaire. La contrainte de faisabilité financière qui est appliquée dans MACARON est modélisée de telle sorte que toute dépense autre que les dépenses de service minimal (voir ci-après) peut être reportée en cas de moyens financiers insuffisants au moment de la demande. Cette section présente la manière dont MACARON procède pour évaluer la faisabilité financière des missions commandées par MECF (requêtes d'investissements en rénovation) et MEDN (requêtes d'investissements BIM).

En premier lieu le modèle interprète les requêtes produites par les modules susmentionnés sous forme de missions :

- La maintenance des bâtiments M (Maintenance) fait partie des postes inclus dans le service minimal assuré par le gestionnaire. Elle est déclenchée chaque année même en cas de moyens financiers insuffisants ;
- La maintenance des modèles de données BIM, MM (Model Maintenance), lorsque ceux-ci existent au sein de l'organisation, est également incluse dans le service minimal assuré annuellement indépendamment des autres commandes ;
- La rénovation des bâtiments, R (Renovation), laquelle entraîne lorsqu'elle est déclenchée

- La rénovation des modèles de données BIM, MR (Model Renovation), qui ne peut avoir lieu que si la mission MC a préalablement été réalisée,
- La construction des modèles de données BIM, MC (Model Construction) est considérée dans le modèle comme ponctuelle et globale à l'échelle du parc. Ici, plusieurs hypothèses relatives à la construction des modèles BIM sont envisageables, y compris celle d'une modélisation progressive du parc (la numérisation de chaque bâtiment pourrait avoir lieu au cours de sa première rénovation par exemple). Nous avons choisi de retenir la solution de numérisation globale du parc hors rénovation, laquelle implique que même les bâtiments non-rénovés sont numérisés (modélisation moins complexe des processus de gestion de données en MIDN et contrainte financière plus importante) ce qui nous semble intéressant dans la poursuite de nos objectifs de modélisation et pourra être discuté en chapitre 8.
- Les autres tâches, O (Others) font partie du service minimal assuré sur le parc. Elles ont été explicitement dissociées des missions précédentes car elles concernent des postes de dépenses du parc, qui n'ont pas d'intérêt à être différenciés sur les bâtiments. Par ailleurs ces dépenses ne sont pas assimilables à des flux de travail. Elles ne sont donc pas soumises à la non-qualité des processus de l'organisation.

Lorsque le sous-modèle MECF reçoit les commandes de service minimal, de rénovation ou de numérisation, le modèle fait un état des lieux de la situation à l'instant t de l'organisation :

- Le BIM est-il déjà en place ? Est-il en cours d'adoption ?
- Les bâtiments pour lesquels une requête de rénovation est formulée ne sont-ils pas déjà en cours de rénovation à l'instant où leur non-conformité à RT est relevée par le modèle ? Rappelons que l'une des caractéristiques fondamentales de la DSC est de provoquer des délais et retards à travers le modèle ce qui explique la nécessité (technique) de cette vérification : il existe un écart de deux pas de temps entre l'instant t où une commande de rénovation est formulée, et l'instant $t+2$ où la consommation énergétique du bâtiment est modifiée par la rénovation.

On utilise une forme logique pour traduire dans le modèle l'ensemble des contraintes exprimées ci-avant, de sorte que MACARON interprète pour chaque bâtiment du parc les diverses commandes sous la forme d'un scénario unique de tâches à accomplir annuellement.

Les combinaisons de missions possibles dans MACARON sont présentées en Table 27 ci-dessous. Le scénario 1(R) correspond à la rénovation d'un bâtiment (R), laquelle entraîne la rénovation des modèles de données (MR) lorsqu'ils existent mais n'interrompt pas les missions de service minimal (M, MM et O). Le scénario de tâches 2(C) correspond à la construction des modèles de données BIM (MC) qui n'interrompt pas non plus le service minimal mais durant laquelle les opérations de rénovation ne sont pas permises. Et enfin le scénario 3(M) incarne les commandes de service minimal en période normale. Lorsqu'un scénario de type 1(R) ou 2(C) ne vérifie pas les conditions de faisabilité financière imposées par le modèle, il est remplacé par un scénario de type 3(M) pour le ou les bâtiment(s) concerné(s).

Table 27. Scénarios de tâches annuelles : missions 1(R), 2(C) et 3(M).

m=						<i>Requested tasks(b,t)</i>
M	MM	R	MR	MC	O	
•	•	•	•		•	1(R)
•	•			•	•	2(C)
•	•				•	3(M)

Requested tasks(b,t) fait parvenir la commande qu'il a générée pour le parc au modèle de coûts présenté en annexe 3. En fonction de l'état des lieux préétabli (BIM, non-BIM etc.), *Tot price(b,t)* fournit une estimation du montant total de travaux à prévoir pour chaque bâtiment avant d'être comparé à la capacité financière de l'organisation dans *MESO feasibility(b,t)*. Si l'investissement à réaliser sur un bâtiment ne peut être financé par l'organisation, son montant est remplacé par celui d'un service minimal sur ce bâtiment. Une fois la faisabilité financière des opérations confirmée ou

infirmée pour l'ensemble du parc, MECF déclenche les ordres de mission correspondants à travers le modèle avec $start\ task(m,b,t)$. Ces ordres de mission sont envoyés en MERH où est réalisée la distribution des tâches et des flux de travail entre les modules MIRH et MIDN et entre les membres de l'équipe de travail en charge des missions précitées.

4. MEDN – Déploiement Numérique

4.1. Diagramme causal synthétique (MEDN)

Le sous-modèle MEDN illustré en Figure 41 ci-dessous représente ici la contrainte de disponibilité des ressources informationnelles (comprendre ensemble de connaissances techniques nécessaire à l'activité de gestion et d'exploitation patrimoniale) pour assurer la trouvabilité des données. Cette dernière représente la capacité de l'organisation à améliorer ses processus en gestion de données (voir ACV selon (FIDJI and Mazars, 2011) ci-après) par la structuration et la centralisation des données.

Dans le chapitre 3 nous soulignons les conséquences potentielles d'une décorrélation entre volumes de données et utilité réelle de celles-ci au regard des activités de l'organisation, sans qu'aient pu être explicitées ni la teneur ni l'ampleur de ces impacts. C'est l'objectif de ce sous-modèle, à travers lequel on souhaite caractériser l'évolution de la densité informationnelle du système d'information (ici, la maquette numérique BIM du bâtiment) au cours du temps, en fonction :

- de la qualité des données produites (flux internes/externes), qui en affectent la disponibilité réelle (une donnée indifféremment erronée, imprécise ou manquante est considérée par le modèle comme indisponible),
- du cycle de vie des données techniques d'exploitation, de gestion,
- de la stratégie BIM, dont on considère que les deux précédents dépendent.

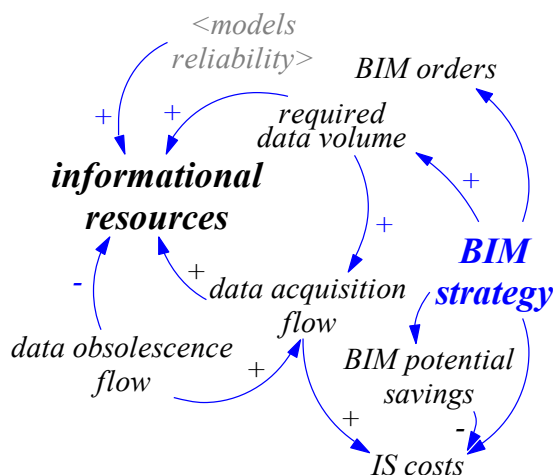


Figure 41. Diagramme causal MEDN.

À travers la représentation des mécanismes internes et externes de gestion (acquisition et mise à jour) des données du bâtiment, MEDN exprime les enjeux de la création de l'information nécessaire à l'exploitation raisonnée des bâtiments du parc. L'hypothèse fondamentale qui sous-tend le fonctionnement de MEDN est qu'une meilleure connaissance des spécificités techniques d'un bâtiment demande un effort, pour sa création et son maintien, mais représente un gisement de valeur indirect en tant que levier de résorption de la non-qualité dans les travaux (en MIRH) et les flux de données (en MIDN).

4.2. Diagramme de flux (MEDN)

Représentée en Figure 42 page suivante, l'hypothèse du modèle est qu'il existe un lien de causalité direct entre les postes d'économies liées à l'utilisation du BIM présentés dans la littérature scientifique (Barlish and Sullivan, 2012; Bougrain, 2018), et le niveau de connaissance qu'il met à disposition de ses détenteurs. Il est postulé que plus le niveau de détail des informations est élevé, plus ces informations sont adaptées et utiles à la gestion-exploitation (Celnik et al., 2015; De Maestri, 2017;

Stegnar and Cerovšek, 2019). Toutefois cela ne saurait être vrai sans l'assurance de disposer d'une information de qualité, fiable, sur laquelle faire reposer des décisions éclairées. C'est l'acquisition de données fiables qui permet (entre autres) d'aboutir à la création de connaissances (ressources informationnelles (Moinet, 2009; Volk et al., 2014). Cela engendre en contrepartie un investissement plus soutenu dans l'activité de gestion de données, donc plus de travail à l'échelle de l'organisation tant dans l'effort d'acquisition que de maintenance de la connaissance technique.

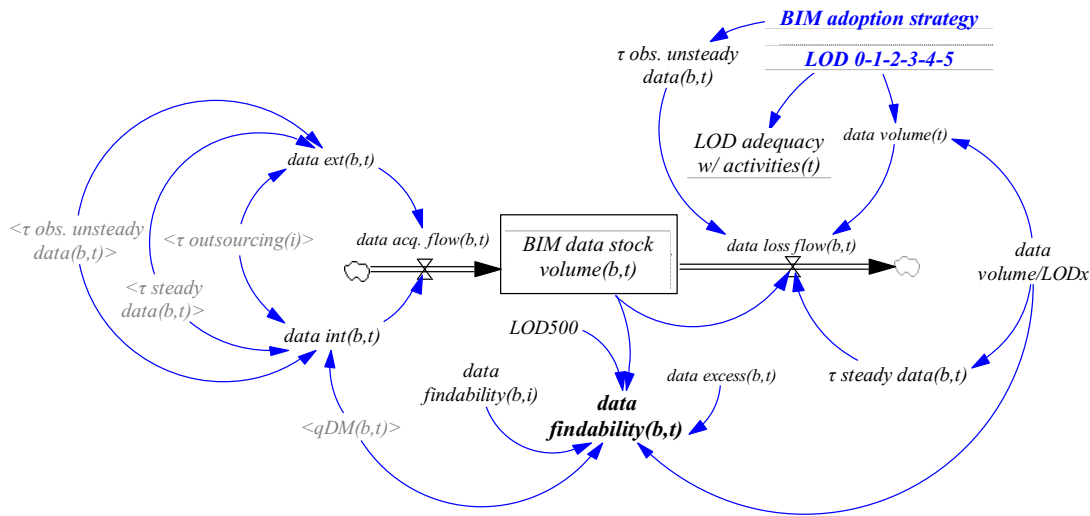


Figure 42. Diagramme de flux MEDN.

Table 28. Nomenclature du diagramme de flux MEDN.

<i>BIM data stock volume(b,t)</i>
Volume de données, mesuré en nombre d'attributs, contenu par le modèle de données du bâtiment b au temps t.
<i>data acq. flow(b,t) / data int(b,t) / data ext(b,t)</i>
<i>data acq. flow(b,t)</i> est le flux total d'acquisition de données pour le bâtiment b à l'instant t. Il se compose des flux d'acquisition de données internes <i>data int(b,t)</i> et externes (sous-traités) <i>data ext(b,t)</i> .
<i>tau outsourcing(i)</i>
Part externe initiale des flux alloués à la gestion des données du bâtiment b au temps t.
<i>tau steady data(b,t)</i>
Part de données stables du modèle de données du bâtiment b au temps t en fonction du LOD qui lui est attribué.
<i>tau obs.unsteady data(b,t)</i>
Taux d'obsolescence des données instables du modèle de données du bâtiment b au temps t en fonction du LOD qui lui est attribué.
<i>data loss flow(b,t)</i>
Flux de perte de données associé au modèle de données du bâtiment b au temps t.
<i>data volume/LODx / data volume(t)</i>
<i>data volume/LODx</i> est le volume de données, mesuré en nombre d'attributs, associé dans ces travaux à chaque LOD tel que détaillé en annexe 2. <i>data volume(t)</i> est le volume de données ainsi attribué à chaque bâtiment b numérisé à un instant t.
<i>LOD adequacy w/ activities(t)</i>
Taux d'adéquation du LOD choisi avec les activités de gestion de patrimoine immobilier attribué au modèle de données du bâtiment b au temps t. On considérera ici que le LOD500 possède un taux d'adéquation optimal. Les hypothèses mises en œuvre dans ces travaux sont présentées en annexe 2.
<i>data findability(b,t) / data findability(b,i) / LOD500 / data excess(b,t)</i>
<i>data findability(b,t)</i> est le coefficient de trouvabilité des informations calculé pour le modèle de données du bâtiment b au temps t, <i>data findability(b,i)</i> étant le coefficient de trouvabilité initial attribué au modèle de données du bâtiment b au temps t=0. Ce coefficient de trouvabilité prend pour référence le volume de données contenu dans un LOD500 considéré ici optimal pour les activités de gestion de patrimoine immobilier. Est pris en compte dans le calcul du coefficient de trouvabilité le volume de données en excès <i>data excess(b,t)</i> (nul dans ces travaux).
<i>qDM(b,t)</i>
Indice de qualité du modèle de données BIM du bâtiment b au temps t. Il représente le ratio du volume des données non corrigées sur le total des heures travaillées (cumul des flux de travail <i>dataflow(p,m,e,b,t)</i>).

Le modèle considère la valeur ajoutée du BIM comme provenant d'une part de la qualité de la donnée relative au bâtiment (exhaustivité et disponibilité) et de la qualité de leur gestion.

Les opérations de rénovation et de maintenance génèrent des flux de données importants, en acquisition ou mise à jour de données, et cela est d'autant plus vrai dans MACARON que le volume de données, le LOD, est important. On souhaite donc représenter ce processus afin de mettre en lumière le surplus de travail que suggèrent différentes stratégies de gestion de l'information (choix du LOD, qualité des flux d'acquisition et de traitement de l'info, internalisation/externalisation de certains processus...).

À l'heure actuelle les commanditaires considèrent que le rendu d'une maquette 3D remplace le poste contractuel de confection du DOE, et qu'à ce titre, il ne doit pas représenter de poste de dépense supplémentaire⁴⁹. Or le DOE n'est pas retravaillé *a posteriori* : il s'agit d'un document qui décrit l'état du bâtiment à la date de livraison d'un ouvrage, contrairement aux bases de données des gestionnaires et aux modèles BIM qui évoluent, *a priori*, tout au long de la vie de l'ouvrage par la mise à jour régulière des données. Ces processus de mise à jour sont exigeants et ne favorisent pas l'exhaustivité et l'exactitude des données contenues dans les bases, paramètres qui sont par ailleurs difficiles à assurer et à mesurer (Feldman and Sherman, 2001; FIDJI and Mazars, 2011). Il devient dès lors intéressant de s'intéresser au cycle de vie non plus du bâtiment lui-même, mais de ses données. Certaines données sont plus sensibles que d'autres à l'obsolescence : les consommations énergétiques varient en fonction des évolutions météorologiques, les caractéristiques des équipements évoluent en fonction de l'entretien qui en est fait..., tandis que la localisation géographique ou la géométrie globale d'un ouvrage sont des informations stables dans le temps. En fonction de ces paramètres, quels surcoûts cachés doit-on attendre d'une gestion de la donnée en évolution ? Bien sûr, cela suppose également une transformation profonde des pratiques managériales existantes (Club Solvabilité 2, 2015; Cuménal, 2014). Mais il existe aujourd'hui, dans le domaine du BIM, très peu d'études visant à quantifier l'impact d'une gestion de donnée efficace sur la qualité des échanges entre opérateurs ou des décisions techniques envisagées (Barlish and Sullivan, 2012). Une réflexion sur une telle problématique pourrait s'inspirer de méthodologies mises en œuvre dans le domaine de la gestion des organisations qui pourraient parfaitement s'appliquer à la question du développement du BIM au sens de Building Information Management.

4.2.1. Densité informationnelle des modèles

Nous avons introduit dès le chapitre 1 l'une des particularités du BIM par rapport aux outils traditionnels qui est sa capacité à « échelonner » le niveau de détail des contenus de données, associés parfois à différentes phases de travaux, missions ou objectifs (voir chapitre 1 PAAS BIM activités). Dans MACARON les volumes de données sont discrétisés sous la forme du LOD. Il est un des éléments de la stratégie du décideur en matière de gestion de la donnée à l'échelle de l'organisation. Les LOD100 à LOD500 supportent un nombre croissant d'attributs, de LOD100 (« boîte » géolocalisée) à LOD500 (jumeau numérique « tel que construit »). Ces LOD ne s'adaptent pas de manière égale aux activités de l'organisation : les attributs contenus dans les différents niveaux de LOD répondent plus ou moins bien aux besoins techniques et managériaux de l'activité du gestionnaire qui incluent des missions de programmation, de conception, d'exécution, de gestion et de maintenance⁵⁰. C'est ce que nous avons traduit par la variable *LOD adequacy w/ activities(t)*.

Les différents LOD ne requièrent donc pas le même effort ni en création ni en maintenance des informations, en plus de représenter différents niveaux d'investissements et d'avantages. Rappelons que dans ces travaux, le LOD est utilisé comme "niveau de développement", lequel inclut à la fois des données géométriques - permettant la visualisation graphique 3D - et le contenu informatif qui y est associé. On admettra ici que plus le LOD est fort et plus le bâtiment virtuel est renseigné, plus il s'approche du « jumeau numérique » du bâtiment (envisagé ici sous le LOD500) et plus il est utile à la diversité des missions assurées par le gestionnaire de patrimoine. C'est sur la base de ces hypothèses que sont déterminées les données initiales de référence utilisées dans MACARON pour la description des LOD, détaillées en annexe 2.

⁴⁹ D'après un entretien personnel avec Julien Mercier, Dirigeant et Fondateur du bureau d'études IM-PACT.

⁵⁰ Voir *BIMétrie*, évaluation de la compétence collaborative BIM multi-agents.

Dans le modèle, l'acquisition de données intervient dans une boucle de rétroaction qui exprime le comportement explosif (au sens de la DSC) du système de traitement des données du bâtiment. En effet, plus on acquiert de données, plus la charge de travail en traitement et mise à jour de ces données est conséquente. Et plus la masse de données à mettre à jour est importante, plus la charge de travail en acquisition de données s'accroît. Ce comportement pose la question de la récupération de la donnée non entretenue après son acquisition. Si l'absence d'entretien freine ce comportement amplifiant, elle souligne par contre l'inutilité des données devenues obsolètes par manque d'entretien.

On a en outre distingué l'acquisition de données en interne et l'acquisition de donnée en externe. Quels que soient les types de travaux envisagés, rénovations ou maintenance, nous avons considéré qu'une partie était en effet sous-traitée, c'est-à-dire confiée contractuellement à un tiers. Cette contractualisation inclut bien évidemment l'acquisition, la gestion ainsi que la restitution des données et informations concernées par les travaux mandatés. Le module MIRH fournit au module MIDN les proportions interne et externe de la charge de travail totale (*internal/external rate of data acquisition*), traduites en nombre d'attributs par les variables *internal/external data acquisition volume*. On considère que le(s) tiers en charge des travaux externalisés restitue(nt) ainsi l'intégralité des données dont l'acquisition lui(leur) incombe. En revanche, tel n'est pas le cas en interne, ce qui peut engendrer une chute progressive du taux d'exhaustivité de la maquette BIM dans le cas où les flux opérationnels de l'organisation en gestion de données sont imparfaits.

On modélise également, comme en MIPE, le phénomène d'obsolescence, ici au cœur du cycle de vie des données numériques. L'obsolescence des données *data lossflow(b,t)*, engendre une perte de données systématique (annuelle) à un rythme propre au LOD : à chaque LOD est associé un taux d'obsolescence des données. Un taux d'obsolescence maximal de 30 %⁵¹ est attribué à un LOD500, c'est le LOD considéré comme le moins stable : chaque année, 30% des données contenues dans la maquette BIM deviennent obsolètes (détail des autres LOD en annexe 2). En construction ou en rénovation des modèles de données les données et informations sont intégralement remises à jour mais sont soumises à l'imperfection des processus en MIDN. Le calcul du taux d'exhaustivité tel que le propose (Rajerison, 2017), détaillé dans la section suivante, prend en compte et pénalise les éléments en excès, démontrant l'intérêt d'analyser les flux de données superflues (ou exploitées à d'autres fins).

4.2.2. Trouvabilité des informations techniques

Dans un contexte spécifique d'absence de données sur le bâtiment existant, MEDN questionne alors la rentabilité de l'outil et de la démarche BIM, en investiguant ses conséquences sur la capacité de l'organisation à générer puis entretenir une ressource informationnelle fiable, trouvable et à-même de servir les objectifs internes poursuivis par le décideur.

Le concept de qualité des informations renvoie, notamment dans le champ de la métrologie, aux notions d'exactitude, de précision ou encore d'utilité. L'utilité a été vue précédemment, à travers la variable *LOD adequacy w/ activities(t)*. On y ajoutera notre appréciation de l'exactitude, la précision et la fiabilité des informations à travers la variable *qDM(b,t)* issue de MIDN.

Une autre approche est celle de (Rajerison, 2017) qui propose une mesure de l'exhaustivité du modèle de données laquelle « rassemble tout ce qui caractérise l'absence de données attendues ou leur présence à tort ». L'équation du taux d'exhaustivité selon (Rajerison, 2017) s'établit comme suit :

Éq. 29

$$\text{taux d'exhaustivité} = 1 - \frac{NbO + NbE}{Nbt}$$

Où :

<i>taux d'exhaustivité</i>	est le taux d'exhaustivité du modèle de données, en pourcents
<i>NbO</i>	est le nombre d'éléments en excès
<i>NbE</i>	est le nombre d'éléments manquants
<i>Nbt</i>	est le nombre d'éléments attendus

Dans la littérature (Club Solvabilité 2, 2015; Feldman and Sherman, 2001) est en outre défini un indicateur de trouvabilité (*findability*) qui contient un ensemble des critères d'accessibilité, de

⁵¹ Voir (Club Solvabilité 2, 2015; Feldman and Sherman, 2001; FIDJI and Mazars, 2011) et (FEDENE and SYNTEC-INGÉNIERIE, 2016)

disponibilité, de standardisation. Dans notre modèle, on s'inspire de l'équation du taux d'exhaustivité selon (Rajerison, 2017) pour calculer la trouvabilité de la donnée dans les modèles BIM. L'indice de trouvabilité $data\ findability(b,t)$ représenterait alors la disponibilité (agrégée) des données en termes quantitatifs. MACARON permet ainsi de mesurer les potentiels écarts entre les ressources informationnelles nécessaires et celles disponibles, occasionnés par différentes stratégies de gestion de la donnée.

On retient le LOD500 comme étant le plus approprié pour l'activité de gestion de patrimoine. Tout autre LOD représente une fraction du LOD500. Dans une situation sans BIM, on considérera que le modèle de données de référence est équivalent, en termes de trouvabilité des données, à un LOD200. On applique la formule du taux d'exhaustivité à cette fraction de sorte que la trouvabilité des données pour un bâtiment b à l'instant t s'établit comme suit :

Éq. 30

$$data\ findability(b,t) = \frac{data\ volume/LODx(b,t)}{data\ volume/LODx(LOD500)} \times \left(1 - \frac{(data\ excess(b,t) + (data\ volume/LODx(b,t) - BIM\ data\ stock\ volume(b,t)))}{data\ volume/LODx(b,t)} \right)$$

Où :

$data\ findability(b,t)$	est le coefficient de trouvabilité des informations calculé pour le modèle de données du bâtiment b au temps t , en pourcents
$data\ volume/LODx(b,t)$	est le volume de données, mesuré en nombre d'attributs, associé dans ces travaux à chaque LOD
$data\ volume/LODx(LOD500)$	est le volume de données, mesuré en nombre d'attributs, associé dans ces travaux au LOD500
$data\ excess(b,t)$	est le volume de données en excès, mesuré en nombre d'attributs
$BIM\ data\ stock\ volume(b,t)$	est le volume de données, mesuré en nombre d'attributs, contenu par le modèle de données du bâtiment b au temps t .

Si la RH est trop peu qualifiée pour gérer l'information, cela se répercutera dans le modèle par la non-atteinte du niveau de qualité attendu. En particulier, les rénovations nécessitent de gros volumes de données et de connaissances pour atteindre un niveau visé ou requis d'efficacité énergétique (comme pour la simulation de scénarios de rénovation, par exemple), en fonction de leur intensité. MEDN formalise ainsi l'hypothèse selon laquelle la qualité de tout travail est indirectement affectée par la quantité de ressources de connaissances utiles disponibles et leur pertinence pour les activités de l'organisation. *A contrario* des connaissances techniques fiables contribuent à réduire les défauts sur site ainsi que les erreurs de conception (Johansson et al., 2014; Love et al., 2011).

Néanmoins, on observe ici que « trop » et « pas assez » de données ont la même conséquence. La moindre trouvabilité des données, qui perturbe les flux de travail, peut provoquer la nécessité de retraitements importants voire une externalisation financière significative (Feldman and Sherman, 2001; Love et al., 2009; Sterman, 2009) ce qui dans MACARON affecte directement les coûts de rénovation et le bilan financier des opérations.

5. MERH - Ressources Humaines

5.1. Diagramme causal synthétique (MERH)

Le sous-modèle MERH est dédié à l'affectation des ressources humaines aux différentes missions de gestion locative et patrimoniale (détail des missions concernées en MECF). La gestion des ressources humaines est au cœur de notre question de recherche et centralise en son sein les multiples enjeux de la stratégie numergétique. En effet dans MACARON la ressource humaine est au centre de tous les processus et à l'origine d'une grande partie des coûts imputés sur le parc. Elle incarne dans nos travaux le vecteur majeur de qualité et de performance du système. L'objectif de modélisation poursuivi en MERH concerne ainsi la représentation des impacts de l'implantation du BIM sur l'évolution de la capacité humaine interne de l'organisation.

MERH questionne ici l'ampleur de la contrainte de capacité humaine qui s'exerce sur l'organisation à la rencontre de la stratégie numergétique du décideur (laquelle demandera un effort variable selon le

niveau d'exigence exprimé) et de l'évolution technologique de l'environnement numérique (dont on suppose qu'elle a un effet significatif sur les processus de formation et sur les processus opérationnels). Ce sous-modèle a pour objectif, dans la phase d'exploitation de ces travaux, d'évaluer l'impact de différentes stratégies d'investissements numergétiques sur la possible rationalisation des consommations de ressources humaines pour les activités de gestion de patrimoine. La Figure 43 ci-dessous présente le diagramme causal du module MERH construit dans ce but.

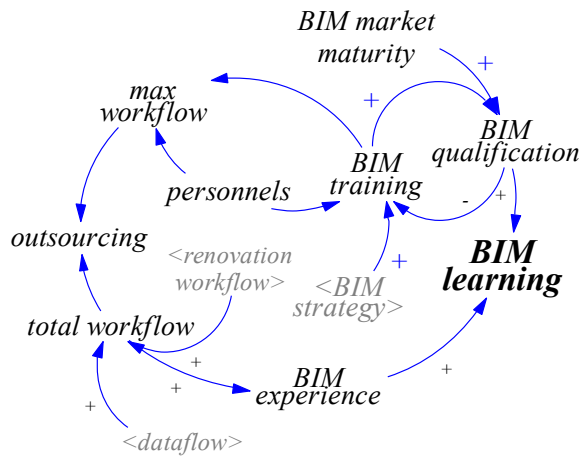


Figure 43. Diagramme causal MIRH.

La stratégie BIM du gestionnaire provoque une potentielle surcharge de travail, liée entre autres à un gonflement des temps de gestion de données d'autant plus important que le LOD est élevé. Ceci est également vrai pour les temps dédiés à la formation des effectifs si le décideur choisit de respecter les préconisations expertes à ce sujet. Ces phénomènes constituent un premier niveau de contrainte dans la gestion des ressources humaines, qui deviennent alors d'autant plus limitées que la stratégie du gestionnaire est ambitieuse.

MERH est soumis d'autre part à l'évolution de l'environnement numérique. La maturité technologique du BIM, comme élément de paysage, constitue une contrainte supplémentaire non-négligeable dans une vision à moyen-terme du déploiement du BIM. En effet le décideur n'a aucun moyen d'action possible sur cette variable et il subit l'incertitude relative à l'horizon de maturité totale et parfaite du BIM : son adoption anticipée peut souffrir des défauts d'interopérabilité non encore résolus ; son adoption tardive peut dégrader le niveau de compétitivité de l'organisation. Se pose alors la question sous-jacente d'une date optimale pour démarrer le BIM, afin de minimiser l'effort nécessaire à son déploiement au sein de l'organisation. Cet effort à fournir en exploitation BIM-centrée est supposé être d'autant moins pénalisant que le BIM permet collaboration et interopérabilité. Or la collaboration BIM n'est possible qu'entre utilisateurs du BIM, et l'interopérabilité ne progressera qu'avec le nombre d'utilisateurs. Notre raisonnement est ici que plus il y a d'utilisateurs BIM, plus le gestionnaire :

- Peut bénéficier des gains du BIM s'il a mis en place l'outil et la démarche, et d'autant plus que son niveau de compétence BIM en interne est élevé,
- Est pénalisé s'il ne dispose pas lui-même de l'outil puisqu'il favorisera une situation de non-interopérabilité entre lui et le reste des acteurs de la construction mettant en œuvre le BIM.

On émet en outre l'hypothèse en MERH que les dynamiques d'évolution de l'environnement numérique ont un impact significatif sur les dynamiques de formations BIM, si on considère que l'innovation BIM est source d'obsolescence partielle de la compétence acquise précédemment. Cette caractéristique du modèle implique potentiellement une variation significative du nombre et du rythme des cycles de formation à assurer. On soutient ici que la maintenance de la compétence BIM revêt une importance tout autant cruciale que la maintenance des données ou du parc pour pérenniser les investissements et la durabilité de leur performance dans le temps. La compétence BIM est représentée en MERH comme étant le produit :

- de la qualification BIM de l'équipe de travail,
- de son expérience en rénovation BIM-centrée,
- du niveau de maturité exogène du BIM.

Ces facteurs conjoints définissent la capacité d'apprentissage de l'organisation, assimilable à sa capacité à tirer parti des bénéfices du BIM. On cherchera à savoir si les investissements numergétiques sont compensés au moins partiellement par d'intéressants gains de temps dans les processus opérationnels ou par une éventuelle résorption de la non-qualité permettant d'améliorer les délais ou l'efficacité des processus.

5.2. Diagramme de flux (MERH)

La Figure 44 présente notre traduction en diagramme de flux des causalités précédemment explicitées. La nomenclature des éléments sera présentée en deux fois, au paragraphe §5.2.1 tout d'abord où sera abordé le processus d'allocation des ressources humaines du modèle aux missions de gestion patrimoniale, puis au paragraphe §5.2.2 dans lequel seront présentées les hypothèses relatives à la création de la compétence BIM interne par les effectifs.

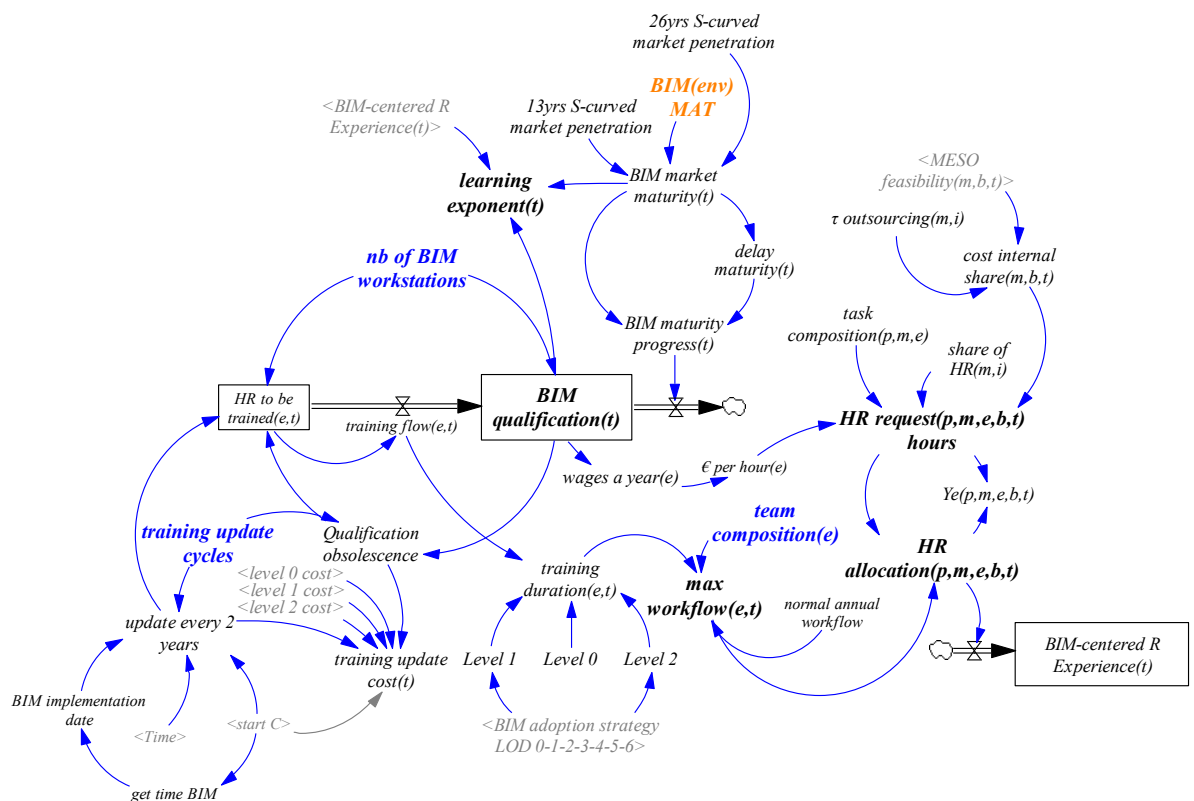


Figure 44. Diagramme de flux MERH.

5.2.1. Allocation de la ressource humaine et expérience BIM

Pour rappel c'est en MECF après vérification de la faisabilité financière des opérations demandées annuellement qu'est validé le montant final des travaux retenus. Il s'agit donc en premier lieu de traduire ces montants budgétaires en flux de travail. On veut pouvoir différencier :

- Les flux internes et externes, initiant une vision multi-agents. On s'intéresse dans ces travaux à l'impact du BIM à l'échelle de l'organisation, donc aux flux internes. Mais l'introduction d'un facteur d'externalisation permettrait, en l'état, d'observer l'impact de fournisseurs ou partenaires « imparfaits ».
- Les flux financiers alloués aux dépenses matérielles et humaines (en interne), pour observer, dans ces travaux, le déphasage et la variation d'amplitude des volumes de temps passés avec ou sans BIM. Cette identification pourrait dans des travaux ultérieurs conduire à analyser la variation des prix en marché BIM et rénovation. Ces dépenses en ressources humaines, rattachées à un coût salarial horaire et à un workflow annuel, permettent de dégager un dimensionnement de l'équipe à l'échelle de l'opération voire de la phase (études / travaux).
- Le type d'effectif concerné par les missions annuelles, et la répartition des flux de travail entre les profils qui constituent l'équipe de gestion-exploitation BIM-centrée du parc de bâtiments.

Le modèle considère dans ces travaux trois profils identifiés : Managers, Techniciens, et Supports. Ici est ébauché un outil de dimensionnement de l'équipe de travail qui prendra donc en compte les paramètres ci-dessus : parts initiales des investissements dédiées aux workflows externalisés et aux matériaux et produits, et implication, en termes de volumes horaires, des différents profils. Notre ambition est que cette partie du modèle puisse par la suite conduire à des analyses plus fines : BIM managers, jeunes diplômés BIM/vs formation des effectifs en place et dynamiques de marché associées.

- Les coûts salariaux associés à ces différents profils de compétence. Si dans ces travaux cette relation n'inclut pas l'évolution des salaires en fonction de l'évolution de profil ou de la compétence des personnels, elle a toutefois été pensée pour introduire d'éventuels développements futurs de cette question spécifique.

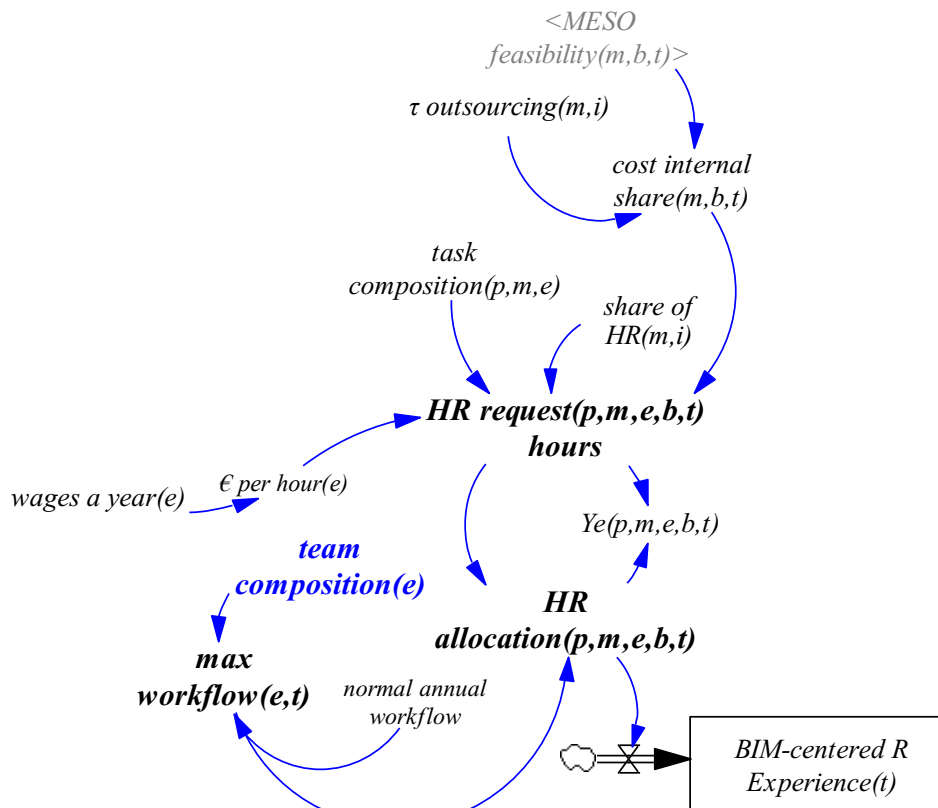


Figure 45. Diagramme de flux partiel MERH : Allocation de la ressource humaine et expérience BIM.

Table 29. Nomenclature du diagramme de flux partiel MERH (Figure 45)

<i>MESO feasibility(m,b,t)</i>	Montant de travaux alloué aux missions m retenues pour le bâtiment b au temps t (voir MECF au présent chapitre au §4.2.).
<i>τ outsourcing(m,i)</i>	Taux d'externalisation de la mission m au temps t=0. Voir Table 30 ci-après.
<i>cost internal share(m,b,t)</i>	Part interne du montant de travaux alloué aux missions m retenues pour le bâtiment b au temps t. Voir Éq. 31 ci-après.
<i>task composition(p,m,e)</i>	Cartographie initiale des besoins humains par type d'effectif e et phase d'opération p pour la réalisation des missions m. L'annexe 3 présente les différents postes de dépenses liés à la réalisation d'une mission m. La variable de <i>task composition(p,m,e)</i> offre la possibilité de distinguer ici non seulement si les postes de dépenses impactent la phase d'études ou de travaux, mais surtout elle permet d'attribuer des charges de travail variables en fonction du type d'effectif e. En effet la réalisation d'une mission m va solliciter différemment les profils qui composent la ressource humaine et si l'on retient comme le modèle une répartition entre managers, techniciens et supports, il est rare qu'une organisation compte exactement le même effectif pour chaque poste. Nos hypothèses quant à une possible distribution des tâches sont présentées en Table 31 ci-après.
<i>share of HR(m,i)</i>	Part du montant de travaux alloué aux ressources humaines pour la mission m au temps t=0. Il s'agit d'une vision volontairement

simplifiée, pour les besoins de la modélisation, de la différenciation des flux financiers associés aux matériaux/produits et à la main-d'œuvre. Voir Table 30.

HR request (p,m,e,b,t) hours

Volume horaire requis pour la réalisation par les effectifs e, des missions m retenues pour le bâtiment b à l'instant t. Voir Éq. 32.

wages a year(e) / € per hour(e) / normal annual workflow

Salaires(en euro) annuellement versés à l'équipe de travail en fonction du profil des effectifs e. Rattachée à une cadence de travail annuelle **normal annual workflow** commune cette fois à tous les profils (indépendamment du fait que ceux-ci soient sollicités à 100% ou non), elle fournit un tarif horaire en fonction du type d'effectif **€ per hour(e)** lequel sera utilisé par le modèle comme base de coût des frais d'externalisation et de non-qualité.

team composition(e) / max workflow(e,t)

La **team composition(e)** est le nombre d'effectifs e que compte chaque profil M, T, S. Dans MACARON, la **team composition(e)** n'est pas fonction du temps, et son dimensionnement relève d'une phase d'initialisation/calibrage du modèle avec mission m = M pour référence. L'équipe de travail est fixe, dimensionnée pour répondre aux demandes de maintenance (voir ci-après : la ressource humaine n'est pas nécessairement occupée à plein temps).

Tant que les volumes horaires dédiés à la formation des effectifs e n'y sont pas rattachés, élément qui sera discuté dans la section suivante, les flux de travail maximum **max workflow(e,t)** que peut fournir l'organisation en pleine capacité sont donc fixes également pour chaque profil.

HR allocation (p,m,e,b,t)

L'allocation de ressources humaines, par type d'effectifs e et par phase p, aux missions m retenues pour le bâtiment b au temps t. **HR allocation (p,m,e,b,t)** relève de la confrontation d'un volume horaire requis pour la réalisation des missions, **HR request (p,m,e,b,t)**, et d'un volume horaire maximum **max workflow(e,t)** que peut fournir l'organisation, au temps t. Cette relation a été graphiquement simplifiée sur le diagramme pour ne pas interrompre le lecteur dans sa compréhension du modèle. Toutefois, une des particularités invisibles de MACARON à cet endroit est l'itération qui se produit dans la distribution des volumes horaires alloués, pour produire une externalisation et des coûts de non-qualité **Ye(p,m,e,b,t)**.

Ye(p,m,e,b,t)

Volume horaire (supplémentaire) de non-qualité généré par chaque type d'effectif e et pour chaque mission m retenue pour le bâtiment b au temps t, que le temps disponible en interne **max workflow(e,t)** n'a pas pu absorber, contenir, et qui constitue donc un poste d'externalisation « renfort », supplémentaire. Cette notion sera largement traitée en chapitre 7.

BIM-centered R Experience(t)

Expérience de l'organisation, en nombre d'années, de la pratique de rénovations BIM-centrées sur le parc. Celui-ci comptabilise, à compter de la date de déploiement du BIM et à chaque instant t où une mission R est déclenchée, une année d'expérience supplémentaire. Cet indicateur de l'ancienneté, dans l'organisation, du BIM affecté à l'acte de rénover, est utile par ailleurs dans MACARON à la définition d'un coefficient d'apprentissage organisationnel **learning exponent(t)** présenté dans la section suivante.

task composition(p,m,e), **outsourcing** et **share of HR** ne sont pas en fonction du temps (cf. chapitre 8). Notre modèle tient compte du gonflement des tâches par l'intermédiaire de la variation des prix ce qui est une simplification pour l'instant nécessaire, mais qu'il serait intéressant d'améliorer par une appréciation quantifiée de la dynamique d'évolution de la distribution des tâches. Concernant **share of HR**, il pourrait s'agir de créer la possibilité d'étudier l'évolution de deux marchés différemment impactés par la transition numergétique : le marché de l'emploi d'une part (qui impacterait les flux financiers liés à la main-d'œuvre à travers les salaires, les compétences sur le marché etc.⁵²) et le marché technique et technologique de l'autre (qui impacterait davantage les prix des matériaux, composants et équipements, en fonction de leur niveau de technicité, d'innovation, de qualité etc.⁵³). S'ils répondent à un certain nombre de lois propres, ces marchés interviennent ici dans les conditions de la faisabilité financière des projets numergétiques.

Table 30. Variables de répartition des montants financiers alloués aux missions m.

m=	τ outsourcing(m,i)	share of HR(m,i)
M	22,5%	60%
MM		100%
R		60%
MR		100%
MC		100%
O		100%

⁵² En allant au-delà de l'échelle MA de notre modèle, une échelle nationale s'intéresserait ici à des dynamiques encore plus macro liés aux enjeux des mondes construction/numérique : augmentation du travail illégal, alignement temporel des programmes d'éducation nationaux sur les cycles d'innovation...

⁵³ En allant au-delà de l'échelle MA de notre modèle, une échelle nationale pourrait introduire des dynamiques de raréfaction des procédés techniques, ou l'essor de la systématisation et de la préfabrication...

Le calcul de la part interne du montant de travaux $cost\ internal\ share(m,b,t)$ alloué aux missions m retenues pour le bâtiment b au temps t s'établit comme suit :

Éq. 31

$$cost\ internal\ share(m,b,t) = MESO\ feasibility(m,b,t) \times (1 - \tau\ outsourcing(m,i))$$

Où :

$cost\ internal\ share(m,b,t)$ est la part interne du montant de travaux alloué aux missions m retenues pour le bâtiment b au temps t en euro

$MESO\ feasibility(m,b,t)$ est le montant de travaux alloué aux missions m retenues pour le bâtiment b au temps t , en euro

$\tau\ outsourcing(m,i)$ est le taux d'externalisation de la mission m au temps $t=0$, en %. Voir Table 30.

La Table 31 présente les hypothèses de distribution des effectifs sur les différentes missions du modèle.

Table 31. Tableau de répartition des volumes horaires alloués aux missions m

m= p, e=	M Maintenance	MM Model Maint.	R Renovation	MR Model Reno.	MC Model Constr.
DM	<i>M cost</i>	<i>BIM model maintenance</i>	<i>renovation investment</i>	<i>BIM model renovation</i>	<i>BIM model construction</i>
<i>M</i>	20%	20%	20%	20%	20%
<i>T</i>	30%	80%	30%	80%	80%
<i>S</i>	0%	0%	0%	0%	0%
DM		<i>software/syste m</i>			
<i>M</i>		0%			
<i>T</i>		0%			
<i>S</i>		100%			
R	<i>M cost</i>		<i>renovation investment</i>		
<i>M</i>	0%		0%		
<i>T</i>	50%		50%		
<i>S</i>	0%		0%		
R	<i>C cost</i>				
<i>M</i>	0%				
<i>T</i>	100%				
<i>S</i>	0%				

Le calcul du volume horaire requis $HR\ request(p,m,e,b,t)$ hours pour la réalisation par les effectifs e , des missions m retenues pour le bâtiment b à l'instant t s'établit comme suit :

Éq. 32

$$HR\ request(p,m,e,b,t) = \frac{cost\ internal\ share(m,b,t) \times share\ of\ HR(m,i) \times task\ composition(p,m,e)}{\text{€ per hour}(e)}$$

Où :

$HR\ request(p,m,e,b,t)$ est le volume horaire requis pour la réalisation par les effectifs e , des missions m retenues pour le bâtiment b à l'instant t en heures

$cost\ internal\ share(m,b,t)$ est la part interne du montant de travaux alloué aux missions m retenues pour le bâtiment b au temps t , en euro.

$share\ of\ HR(m,i)$ est le déclencheur des opérations de maintenance (0 ou 1)

$task\ composition(p,m,e)$ est la part du volume horaire total allouée par type d'effectif e et phase d'opération p pour la réalisation des missions m en %

$\text{€ per hour}(e)$ est le tarif horaire en fonction du type d'effectif e en euros par heure travaillée

5.2.2. Formations, qualification et apprentissage par l'expérience

Un des objectifs de MERH est d'étudier la création de la compétence BIM interne. Celle-ci est incarnée dans le modèle par la variable d'apprentissage, c'est-à-dire la capacité de l'organisation à améliorer ses processus par l'utilisation du BIM. L'apprentissage repose dans le modèle sur la combinaison de trois facteurs : i) la qualification BIM de l'organisation ; ii) l'expérience de l'organisation en rénovations BIM-centrées ; iii) la maturité technologique du BIM.

La qualification BIM résulte du processus de formation (gain) et du processus d'obsolescence des contenus appris (perte). Or l'obsolescence de la qualification BIM du gestionnaire est occasionnée par la montée en maturité technologique du BIM : cette dernière possède dès lors un double impact dans le calcul du coefficient d'apprentissage, direct (voir ci-dessus) et indirect par son action sur le niveau de qualification. Le coefficient d'expérience cumule simplement les années de pratiques BIM en interne. La qualification BIM, l'expérience et l'apprentissage constituent la clé de voûte de l'amélioration des processus de gestion de données.

Le processus de formation se caractérise dans le modèle par les relations dynamiques mises en lumière en chapitre 3 entre :

- Cibles : profils et nombre de personnels ; LOD retenu pour la numérisation du parc
- Fréquence de renouvellement
- Coût
- Volume horaire
- Niveau de qualification à atteindre
- Temps de travail annuel effectif.

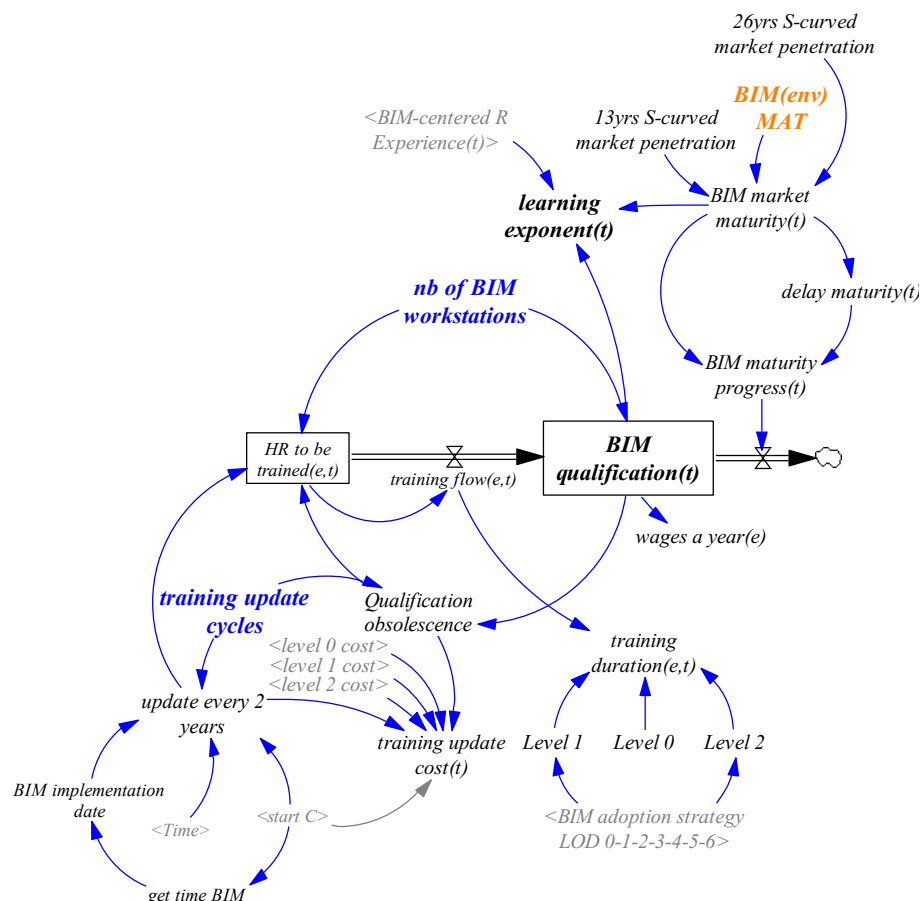


Figure 46 Diagramme de flux partiel MERH : Gain de qualification BIM par la formation.

Table 32. Nomenclature du diagramme de flux partiel MERH (Figure 46).

HR to be trained(e,t)

Nombre et profil des effectifs e concernés par une requête de formation BIM au temps t

nb of BIM workstations

Nombre de postes BIM et par extension, nombre de personnels qualifiés ou à qualifier BIM

training flow(e,t)

Flux de formation au temps t par types d'effectifs e.

BIM qualification(t)

Niveau moyen de qualification BIM de l'organisation au temps t (0-1)

BIM maturity progress(t) / BIM market maturity(t)

Gain de maturité technique des outils et processus BIM au temps t, en %. La variable ***BIM maturity progress(t)*** est vecteur d'obsolescence de la qualification BIM. Elle dépend directement de la variable d'environnement ***BIM(env) MAT***, laquelle dicte un scénario d'évolution de la maturité technique de ***BIM market maturity(t)*** (100% à horizon 13 ou 26 ans). ***BIM market maturity(t)*** décrit un des comportements de référence du modèle : la courbe d'adoption envisageable du BIM selon la théorie de Rogers sur les dynamiques d'adoption de l'innovation. Ici ***BIM market maturity(t)*** est modélisée sous la forme « parts de marché cumulées ».

learning exponent(t)

Coefficient d'apprentissage de l'organisation au temps t.

training update cycles / training update cost(t)

Respectivement la fréquence des cycles de formations BIM, en années et le coût du renouvellement des formations au temps t, en euros.

training duration(e,t)

La durée totale de formation, en heures, par type d'effectif e au temps t

Les hypothèses de coûts et durées des formations BIM retenues sont formulées sur la base de l'analyse des offres de formation proposées dans le catalogue CSTB. On retient pour nos travaux des formations certifiantes présentant des niveaux de qualifications distincts (bases ou spécialisation BIM pour l'activité de gestion de patrimoine immobilier). On observera ici l'effet de la distribution complexe des requêtes de formation à travers l'équipe de travail sur les contraintes financières et humaines qui s'appliquent sur le parc par rapport à un cas de non-formation des effectifs.

Les formations BIM proposées par le CSTB, et les formations bureautiques qui y sont pratiquées en interne, ont été prises en exemple pour déterminer trois niveaux d'intensité de formation numérique :

Table 33. Coûts et durées des formations *training cost(t)* et *training duration(t)*.

	<i>Level 0</i> <i>Bases bureautiques</i> Non-certifiant	<i>Level 1</i> <i>Bases BIM</i> Certifiant	<i>Level 2</i> <i>Spé GPI</i> Certifiant
Coût [€/effectif e]	500,0	5000,0	4000,0
Durée [h/effectif e]	14,0	52,5	45,5

Les choix du *nb workstations* (à qui s'adressent les formations : intégralité des effectifs, des profils ?), et des cycles de formation *training update cycles* (proaction ou détection ?) sont laissés libres dans le modèle, ce qui n'est pas le cas du niveau de formation que nous avons choisi de contraindre par le niveau de numérisation du parc (LOD) retenu en stratégie numergétique.

Si le LOD n'est pas, dans la plupart des prestations de formation en BIM, un critère de choix explicite, il a été mis en évidence en chapitre 3 que l'intensité de numérisation et de modélisation visée requiert un savoir-faire et une expérience BIM d'autant plus importants que la stratégie numérique est ambitieuse. C'est pourquoi nous avons établi, sur la base des dires d'experts produits en phase de conception de ces travaux (cf. chapitre 3), une matrice mettant en relation les niveaux de formation à assurer par le décideur en fonction du LOD voulu pour le parc et des profils de l'équipe de gestion-exploitation.

Table 34. Préconisations recueillies auprès des experts CSTB en matière de formation BIM.

$e \backslash$ LOD	Manager		Technicien		Support	
	Niveau de formation (Level 1 ou 2)					
	1	2	1	2	1	2
LOD100	•		•		•	
LOD200	•	•	•		•	
LOD300	•	•	•		•	
LOD400	•	•	•	•	•	
LOD500	•	•	•	•	•	

Le niveau 0 de formation est considéré dans le modèle comme une situation normale de référence : elle s'applique quelle que soit la stratégie BIM qui y est associée. L'adoption du BIM génère, quel que soit le LOD choisi, un besoin en formation minimum de niveau 1 (formation certifiante sur les fondamentaux du BIM) lequel est considéré comme un prérequis⁵⁴ indispensable à l'utilisation rationnelle des outils BIM. Le niveau 2 de formation (formation certifiante avancée sur les outils BIM et la pratique GPI⁵⁵ BIM-centrée) n'est en revanche pas appliqué de manière égale à travers la matrice ni aux différents effectifs ni aux différents LOD. On estime en effet que ce savoir-faire spécialisé concerne davantage les LOD les plus élevés et les effectifs qui seront amenés à pratiquer le BIM Management en plus du BIM Modeling, c'est-à-dire dans ce modèle les managers et les techniciens.

Le modèle introduit ensuite une différenciation entre l'investissement dégagé pour le premier cycle de formation BIM et les suivants, alloués au renouvellement des formations et qualifications associées. Lors du premier cycle de formation, le modèle considère, que quel que soit le niveau de formation final demandé par la stratégie, les niveaux de formation inférieurs sont un préalable obligatoire.

Ainsi, si à l'adoption du BIM le personnel doit obtenir une certification de niveau 2, il devra auparavant avoir effectué la formation de niveau 1. Le renouvellement des formations en revanche ne concerne que le niveau de formation le plus élevé atteint par les employés (voir Table 35 ci-dessous).

Table 35. Niveau de formation requis par type d'effectif : exemple en LOD300-400.

		LOD300	LOD400
<i>Investissement(t=x)</i>	M	Level ⁵⁶ 1+ Level 2	Level 1+ Level 2
	T	Level 1	Level 1+ Level 2
	S	Level 1	Level 1
<i>Renouvellement(t=modulo(time,y))</i>	M	Level 2	Level 2
	T	Level 1	Level 2
	S	Level 1	Level 1

Le modèle génère un stock d'effectifs à former au fur et à mesure que déroulent les éléments de stratégie ci-dessus explicités. Celui-ci est vidé au fur et à mesure des cycles de formation, dans le respect des contraintes de capacité annuelle⁵⁷. Ce paramètre est également laissé libre au choix du décideur ; nos hypothèses de simulation sont présentées ci-après.

⁵⁴ Ensuite le fait que le décideur inclue ou non tous les types de profils dans la stratégie de formation BIM relève de ses choix propres notamment à travers *nb workstations*, il peut tout-à-fait comme en stratégie de rénovation proactive se détacher des préconisations proposées par le modèle lesquels ici ne représentent pas un critère réglementaire.

⁵⁵ Gestion de Patrimoine Immobilier.

⁵⁶ S'applique pour les volumes financiers et horaires associés au niveau de formation 1 ou 2 selon Table 33.

⁵⁷ Il n'est pas rare qu'il soit d'ailleurs tout simplement impossible pour une organisation de former tous les effectifs à la même intensité la même année, tant du point de vue des budgets que des workflows.

De ce fait le modèle n'exclut pas la possibilité de prendre du « retard » dans les formations, si le rythme de formation choisi est trop important au regard du nombre d'effectifs à former annuellement par exemple.

Dans une version antérieure du modèle, seul un effectif de chaque type de profil, M, T et S pouvait être formé annuellement, soit un maximum de trois formations annuelles. En fonction de la taille de l'équipe de travail et *a fortiori*, du rythme soutenu ou non du renouvellement des formations, les périodes de formation étaient allongées de manière si considérable que l'organisation ne parvenait dans certains cas jamais à atteindre le plein potentiel de qualification BIM en dépit d'investissements financiers lourds. C'est par cette étape du calibrage que s'est révélé le trilemme (*training flow, training cycles, max workflow*), tout en participant à la démonstration de la robustesse du modèle vis-à-vis de la complexification locale de certaines relations.

Dans ces travaux le modèle est configuré de telle sorte que chaque année, l'ensemble des demandes de formation est satisfaite (cette hypothèse sera utile en chapitre 7).

Par ailleurs, si la compétence BIM de l'organisation, qui repose en partie sur la qualification individuelle de ses membres, est alimentée par ce processus de formation, elle est aussi rendue obsolète par la progression rapide des développements techniques et technologiques BIM. Ainsi le calcul de *BIM qualification(t)* la qualification BIM interne à l'instant t s'établit comme suit :

Éq. 33

$$\begin{aligned} \text{BIM qualification}(t) &= (\text{training flow}(t) \div \text{nb of BIM workstations}) \times (1 - \text{BIM qualification}(t - 1)) \\ &\quad - \text{BIM qualification}(t - 1) \times \text{BIM maturity progress}(t) \end{aligned}$$

Où :

<i>BIM qualification(t)</i>	est le niveau moyen de qualification BIM de l'organisation au temps t (0-1)
<i>training flow(t)</i>	est le flux de formation au temps t par types d'effectifs e
<i>nb of BIM workstations</i>	est le nombre de postes BIM et par extension, nombre de personnels qualifiés ou à qualifier BIM
<i>BIM maturity progress(t)</i>	est le gain de maturité techniques des outils et processus BIM au temps t, en %.

Le niveau de qualification BIM de l'organisation est donc directement affecté par l'évolution de la maturité technologique du BIM. L'équation de la progression de *BIM market maturity(t)* à l'instant t s'écrit :

Éq. 34

$$\text{BIM maturity progress}(t) = \text{BIM market maturity}(t) - \text{BIM market maturity}(t - 1)$$

Où :

<i>BIM maturity progress(t)</i>	est le gain de maturité technique des outils et processus BIM au temps t, en pourcents
<i>BIM market maturity(t)</i>	est le niveau de maturité technique des outils et processus BIM au temps t, en pourcents

Le niveau de maturité, et l'expérience et la qualification BIM de l'organisation sont ensuite dans MACARON facteurs d'amélioration de la capacité de l'organisation à tirer parti des processus BIM, incarnée dans ces travaux par un coefficient d'apprentissage *learning exponent(t)* dont l'équation s'écrit :

Éq. 35

$$\begin{aligned} \text{learning exponent}(t) &= 0.028 \times (\log((1 + 0.1 \times \text{BIM} - \text{centered R Experience}(t)^{0.1}), 10) \\ &\quad + \sqrt{\text{BIM qualification}(t)^2 + \text{BIM market maturity}(t)^2}) \end{aligned}$$

Où :

<i>learning exponent(t)</i>	est le coefficient d'apprentissage de l'organisation au temps t
<i>BIM market maturity(t)</i>	est le niveau de maturité technique des outils et processus BIM au temps t, en pourcents
<i>BIM qualification(t)</i>	est le niveau moyen de qualification BIM de l'organisation au temps t (0-1)
<i>BIM-centered R Experience(t)</i>	est l'expérience de l'organisation, en nombre d'années, de la pratique de rénovations BIM-centrées sur le parc au temps t

Enfin, le flux des formations $training\ flow(e,t)$ impacte indirectement les flux de travail par le dévoiement plus ou moins important de volumes horaires affectés à la formation des personnels. Ceux-ci sont retranchés de la capacité humaine $max\ workflow(e,t)$ de l'organisation dont le calcul au temps t s'établit comme suit :

Éq. 36

$$max\ workflow(e,t) = team\ composition(e) \times normal\ annual\ workflow - training\ duration(e,t)$$

Où :

$max\ workflow(e,t)$	est le flux de travail maximum que peut fournir l'organisation pour chaque profil : sa capacité humaine au temps t
$training\ duration(e,t)$	est la durée totale de formation, en heures, par type d'effectif e au temps t
$team\ composition(e)$	est le nombre d'effectifs e que compte chaque profil M, T, S
$normal\ annual\ workflow$	est la cadence de travail normale annuelle, en heures

6. Synthèse du chapitre 5 : fondamentaux de la sphère décisionnelle

L'objectif de modélisation du niveau MESO concerne la définition des leviers décisionnels de la stratégie numergétique du gestionnaire pour la mutation du parc et de l'organisation. L'articulation des sous-modèles MEPE, MECF, MERH et MEDN nous a permis de formaliser les contraintes de capacité associées à la disponibilité des ressources (financières, humaines, informationnelles) auxquelles est soumis le gestionnaire dans sa prise de décision, ainsi que la prise en compte des contraintes réglementaires de rénovation et de leur évolution temporelle.

La modélisation quantitative de ce niveau traduit la façon dont l'information issue de la sphère opérationnelle est traitée dans la sphère décisionnelle, et comment les ordres d'intervention sont ensuite redirigés sur le parc au niveau MICRO pour satisfaire les objectifs de conformité du parc aux objectifs énergétiques réglementaires et aux objectifs stratégiques du décideur. Le niveau MESO développé dans le présent chapitre constitue le cœur de MACARON : on explorera dans la phase d'exploitation les impacts conjoints la stratégie numergétique du gestionnaire et des conditions opérationnelles de l'organisation et du parc sur l'évolution à moyen-terme de la performance de ces derniers. Les chapitres 6 et 7 qui font suite présentent respectivement la méthodologie d'expérimentation de MACARON et les résultats de notre exploration du modèle.

TROISIEME PARTIE

————— Analyse —————

CHAPITRE 6

EXPERIMENTATION DU MODELE

*« Un jour, j'irai vivre en Théorie,
car en Théorie tout se passe bien. »*

Auteur inconnu et activement recherché⁵⁸

1. STRUCTURATION DE LA DEMARCHE D'EXPERIMENTATION	157
2. SCENARIOS D'EXPLOITATION ET PARAMETRES DE MACARON.....	158
2.1. SENSIBILITE AUX CONDITIONS INITIALES : SC0	158
2.1.1. Profil de Parc (PP)	160
2.1.2. Valeur verte (VV)	161
2.1.3. Valeur Locative (VL).....	163
2.2. SENSIBILITE A LA STRATEGIE DE RENOVATION : SC1	164
2.2.1. Réglementation Thermique pour la rénovation (RT)	165
2.2.2. Rénovation du mix énergétique (MIX)	166
2.3. SENSIBILITE A LA STRATEGIE DE DEPLOIEMENT DU BIM : SC2	166
2.3.1. Stratégie de numérisation (LOD)	167
2.3.2. Politique de formation (FORM).....	168
2.4. SENSIBILITE A L'ENVIRONNEMENT BIM : SC3	169
2.4.1. Évolution de la maturité technique du BIM (MAT).....	169
2.4.2. Date de déploiement du BIM (T0).....	170
2.5. SENSIBILITE A L'ENVIRONNEMENT ENERGETIQUE : SC4	170
2.5.1. Dérive du prix des énergies (DER)	171
2.5.2. Coût de la valeur verte en exploitation (VV')	172
2.6. COMPARAISON DE TROIS APPROCHES NUMERGETIQUES CONTRASTEES : SC ELS.....	172
3. ÉVALUATION DES RESULTATS DU MODELE : ELEMENTS D'ANALYSE QCD.....	173
4. SYNTHÈSE DU CHAPITRE 6.....	175

⁵⁸ https://www.libération.fr/france/2017/02/13/ou-l-on-enquete-avec-marc-levy-sur-une-citation-qui-n-est-pas-de-pierre-desproges_1548218

La démarche de modélisation des niveaux MICRO et MESO détaillée aux chapitres précédents nous a permis de formaliser les interactions via lesquelles nous envisageons la relation entre transition énergétique et transition numérique, à deux échelles spatiales de la gestion de parc immobilier que sont le parc de bâtiments et l'organisation gestionnaire.

L'exploitation de MACARON (Modèle d'Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique) va maintenant nous permettre d'analyser les variables clés, les relations primordiales, les effets induits et les tendances majeures de la transition numergétique.

La démarche d'expérimentation du modèle mise en œuvre aboutira à la construction de scénarios contrastés dont la simulation et l'exploitation des résultats constitueront la synthèse de ces travaux.

1. Structuration de la démarche d'expérimentation

Pour répondre à nos objectifs, l'exploitation du modèle est organisée en six questions majeures (Figure 47), donnant lieu à une configuration spécifique du modèle (voir Table 36 page suivante). L'intrication de ces questions au cœur de MACARON rend l'analyse de résultats agrégés fastidieuse et ardue. C'est l'une des limites de la méthode DSC que nous avons appréhendée en chapitre 2. C'est pourquoi nous avons structuré l'analyse de ces questions-clés sous une forme incrémentale nous permettant, lors de l'analyse de sensibilité du modèle, de disséquer progressivement les effets locaux des différents paramètres retenus jusqu'à aboutir à une vision globale.

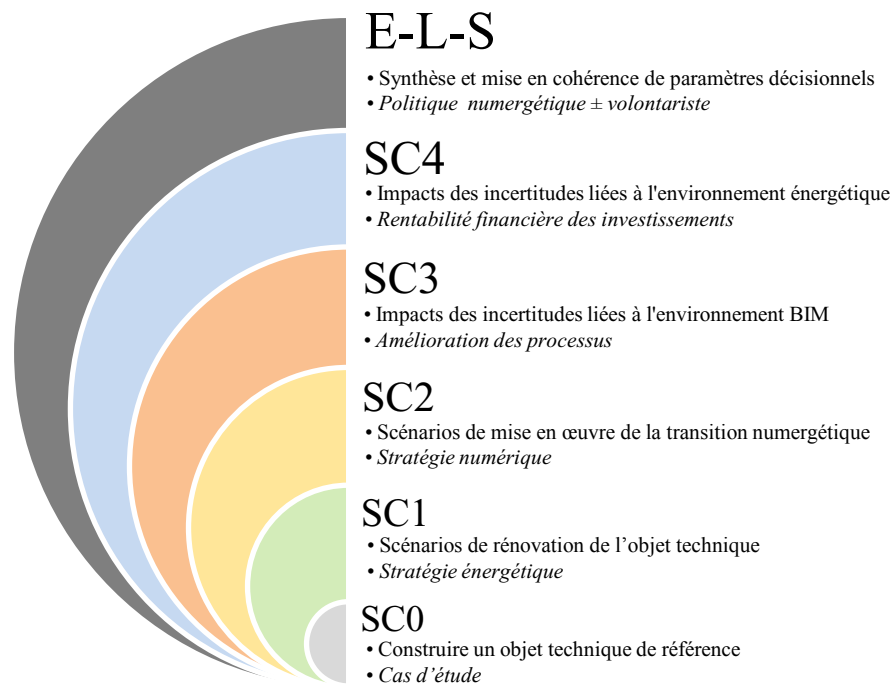


Figure 47. Incrémentation des scénarios d'exploitation de MACARON.

L'ambition de MACARON est donc de comprendre la transition numergétique, sans chercher à la quantifier précisément. Nos principales observations émergeront moins des résultats de simulation de MACARON à proprement parler que de la comparaison des résultats obtenus d'un scénario à l'autre.

Entre *SC0* et *SC1*, on mettra en lumière l'amélioration de la performance énergétique du parc générée par des scénarios de rénovation (politique publique + choix constructifs privés), en comparant notamment les consommations énergétiques du parc de référence (obtenues en *SC0*) à celles du parc rénové (calculées en *SC1*).

Entre *SC1* et *SC2*, on comparera les effets de la transition énergétique du parc et de sa transition numergétique. Comment se caractérise l'émergence de nouveaux besoins en termes de ressources, de compétence BIM ? Quel décalage dans le temps des volumes horaires et financiers provoquent-ils à

l'adoption du numérique ? L'amélioration énergétique produite en SC1 évolue-t-elle en SC2, positivement ou négativement ?

Entre SC2 et SC3, on investigate les conditions de mise en œuvre du BIM. Les conditions de marché et la date de déploiement génèrent-elles des dérives importantes des besoins susmentionnés ? Ont-elles un impact significatif sur l'apprentissage organisationnel et la performance du parc ?

Entre SC3 et SC4, on questionne la rentabilité économique des opérations de rénovation énergétique menées sur le parc. Le BIM améliore-t-il la rentabilité des opérations en rénovation numergétique ? Le contexte énergétique a-t-il un impact significatif sur la rentabilité des opérations stratégiques de numergétisation du parc ?

Enfin, SC ELS consiste en la synthèse et la mise en cohérence des paramètres décisionnels sous forme d'alternatives stratégiques contrastées, réalistes, plus ou moins volontaristes dans la démarche numergétique. Les alternatives E, L et S sont voulues représentatives de « comportements type » révélateurs de niveaux d'implication relatifs du décideur dans la transition numergétique. Les combinaisons de paramètres appliquées à chacun des scénarios E, L et S sont présentées en paragraphe §2.6. Dans cette analyse on ne discernera plus les effets locaux, mais bien les effets agrégés du paramétrage de chaque profil stratégique. La Table 36 ci-dessous synthétise les paramètres (préalablement introduits au début des chapitres 4 et 5) qui seront analysés dans chaque scénario.

Table 36. Code de référencement commun pour l'identification des configurations d'analyse.

CODE :	SC	-	PP	VV	VL	-	RT	MIX	-	FORM	LOD	-	T0	MAT	-	DER	VV'
	SC0						SC1			SC2			SC3			SC4	
	E - L - S																

La section suivante présente le détail de ces scénarios d'exploitation et de leur paramétrage dans MACARON. Les résultats des analyses de sensibilité correspondantes feront l'objet du prochain chapitre 7.

2. Scénarios d'exploitation et paramètres de MACARON

2.1. Sensibilité aux conditions initiales : SC0

Dans notre vision du système numergétique, détaillée au chapitre 3, nous mettons en lumière la possible sensibilité de MACARON à la caractérisation du parc et à la configuration du cas d'étude. L'exploitation du modèle présuppose de s'affranchir de trois obstacles dans son initialisation.

- Le premier concerne l'absence avérée de jeux publics de données associant des séries temporelles de données énergétiques, économiques, humaines et numériques à la fois en situations BIM/non BIM et avant rénovation/après rénovation du parc. De tels jeux de données n'existent ni dans la littérature, ni au sein des organisations. La construction de notre cas d'étude réaliste devra donc s'appuyer sur un ensemble d'hypothèses tangibles. On reviendra sur ce point en chapitre 8.
- Une autre difficulté de cet exercice, révélée tant par l'analyse bibliographique que par nos rencontres avec de nombreux gestionnaires au cours de la thèse est la très forte hétérogénéité des parcs immobiliers, même limités au secteur résidentiel : effectif, étendue, typologie, performance, usage, etc. La démarche de modélisation n'a cependant en rien préjugé de caractéristiques particulières du parc mis en place dans cette exploitation. Là encore, au-delà d'un cas d'étude réaliste et représentatif, les développements ultérieurs s'attacheront, notamment dans une orientation concrète de l'outil, à se prémunir d'une application à des cas trop atypiques.
- Le dernier verrou touche aux capacités graphiques de l'outil de modélisation. Si Vensim répondait parfaitement à notre cahier des charges de développement, il pêche dans la mise en valeur des résultats au regard du grand nombre d'indices rendus nécessaires par la logique de modélisation de MACARON. La construction de l'échantillon d'étude, réaliste et cohérent, répond à l'objectif d'un compromis satisfaisant entre pertinence des résultats et lisibilité des produits de l'outil.

La Table 37 ci-dessous présente les données d'initialisation utilisées dans MACARON pour caractériser le parc d'objets techniques et l'organisation qui le gère. Le détail de ces hypothèses sera abordé en temps voulu au cours des prochaines sections.

Table 37. Initialisation du modèle : profils de l'organisme gestionnaire et du parc.

Profil du parc		Profil de l'organisation gestionnaire	
Nombre de logements par objet technique <i>bâtiment</i>	20<x<50	Type d'effectifs	Managers, Techniciens, Supports (3)
Surface des logements	67m ²	Répartition des missions	Cf. Table 31
Bstock surf(t32)	35 180m ²	Externalisation(i)	Cf. Table 30
Nombre d'OT <i>bâtiment</i> contenus dans le parc	15	R supply	2 rénovations/an
Localisation (Zone thermique)	ZH1		
Mix énergétique(i)	MIX* (Gaz ; Eléc) = (79 ; 21)%		
Valeur locative	VL*		
Profil de Parc : cartographie des performances énergétiques	PP*		
Valeur Verte : prise en compte de l'externalité « valeur verte »	VV*		
Coefficients de maintenance	1%<x<3%		

*Testés en analyse de sensibilité en chapitre 7 (PP, VV et VL en SC0 ; MIX en SC1).

Parmi ces variables, trois font l'objet d'une analyse de sensibilité du modèle aux conditions initiales en SC0, avant que ne soient envisagées de quelconques stratégies énergétique ou numérique : PP le Profil énergétique du Parc, VV l'externalité de valeur verte des bâtiments et VL la valeur locative par unité de surface, imposée dans l'exercice de l'organisation. Le choix de ces variables (et des paramètres retenus dans l'analyse des autres scénarios) est motivé par leur capacité à être évalués quel que soit le type de parc d'objets techniques considéré. Cartographie de performances, niveau d'attractivité de la performance pour les usagers et revenus générés par l'exploitation sont des informations qui peuvent être rendues disponibles ou déductibles par la production de données de base en gestion locative/patrimoniale.

La Table 38 ci-dessous présente la synthèse des configurations de MACARON qui seront explorées en SC0. Les sous-sections suivantes détaillent le paramétrage de PP, VV, VL.

Table 38. Cartographie des configurations SC0.

0-E1Y - Référence

SC 0	REFERENCE				ENERGIE			NUMERIQUE							RESS. HUMAINES	ECONOMIE												
	PP	VL			MIX	I	E	R	FORM	1	0	0	1	2	3	4	5	MAT	1	2	DER	2	1	M	N	P		
		X	Y	N																							0	1
	VV	4	1	0		9	5	1																			TO	5

- paramètres activés : test des configurations du SC en cours
 - paramètres activés : selon configurations retenues
 - paramètres désactivés
- PP** A : Linéaire
B : Logarithmique
C : Exponentiel
D : Sigmoide
E : Parc social

2.1.1. Profil de Parc (PP)

Notre vision du système numergétique rapproche le profil du parc PP de sa cartographie énergétique initiale à $t=0$. Par construction, MACARON établit une relation entre performance énergétique et contraintes financières et humaines au sein de l'organisation gestionnaire. On cherche ici à évaluer l'intensité de cette relation.

On analysera la sensibilité de MACARON à cinq différentes distributions de performances énergétiques à travers le parc. Introduites ci-avant en Table 37, nos hypothèses de dimensionnement du parc à rénover concernent :

- La taille du parc :

MACARON considère un parc de 15 bâtiments (indices B01 à B15),

- Logements et surface :
 - Distribution linéaire/aléatoire du nombre de logements par bâtiment
 - Nombre minimal : 20 logements
 - Nombre maximal : 50 logements
 - Surface unitaire / logement constante = 67 m^2
- Consommations unitaires :
 - Consommation unitaire des bâtiments croissante de B01 à B15⁵⁹
 - Parc étalé entre C+ (proche de la classe B) et G+ (proche de la classe F)
 - Consommation B01 = $100 \text{ kWhep}/(\text{m}^2.\text{an})$ (sauf PP E)
 - Consommation B15 = $474 \text{ kWhep}/(\text{m}^2.\text{an})$.

La construction des profils de parc présentée en Table 39 est détaillée en annexe 4.

Table 39. Répartition des consommations unitaires :
dimensionnement du parc PP.

PP	PP A	Répartition linéaire Distribution linéaire des consommations unitaires sur l'ensemble de l'intervalle [100 ; 474]
	PP B	Répartition exponentielle Distribution exponentielle, présentant par rapport à PP A davantage de bâtiments moins consommateurs
	PP C	Répartition logarithmique Distribution logarithmique, présentant par rapport à PP A davantage de bâtiments plus consommateurs
	PP D	Répartition sigmoïdale Distribution sigmoïdale, présentant par rapport à PP A davantage de bâtiments aux extrêmes de consommation sur l'intervalle considéré
	PP E	Répartition reconstituée à partir des données CGDD À partir des données sur le parc locatif social au 1 ^{er} janvier 2018, présentant une répartition en classes énergétiques similaire

On suppose ainsi que la composition même des parcs induit des dynamiques de rénovation variables de l'un à l'autre.

La Figure 48 page suivante exprime visuellement le contraste entre ces différentes distributions et leur répercussion sur la cartographie énergétique initiale à $t=0$ du parc à rénover.

⁵⁹ Purement technique et pratique, ce classement n'a aucune incidence sur les résultats.

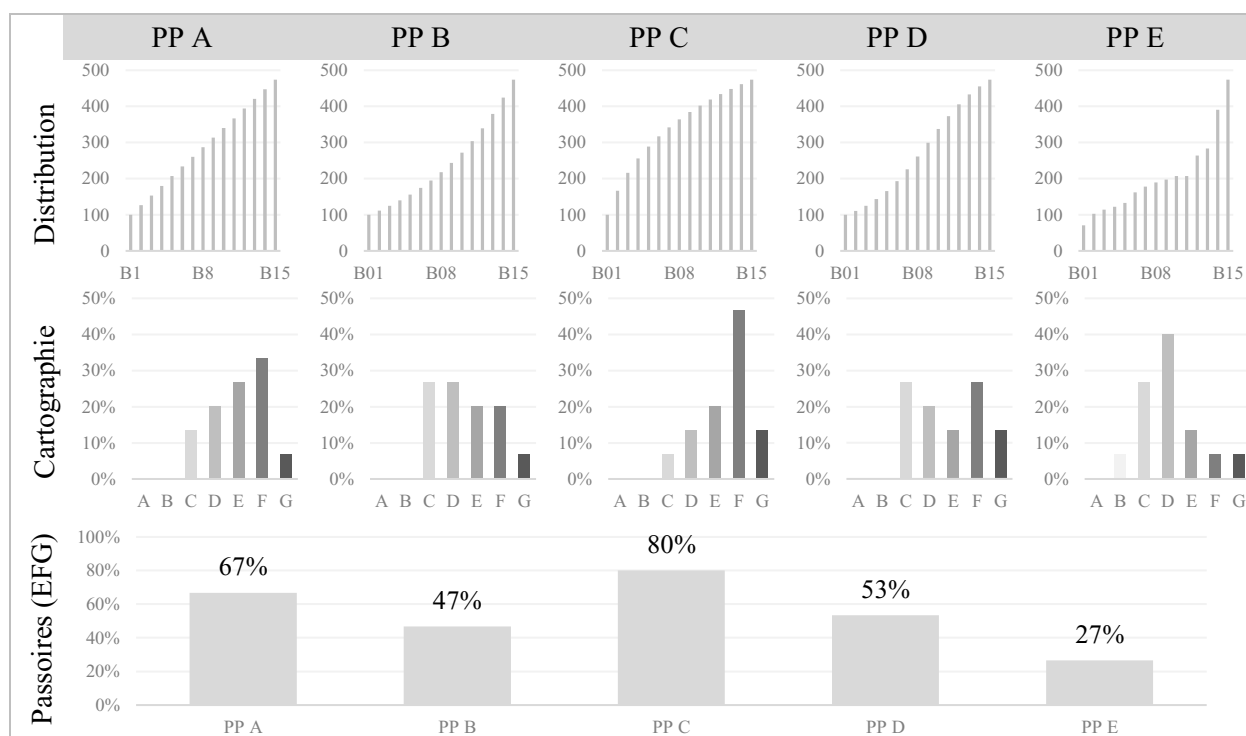


Figure 48. Consommation énergétique unitaire et distribution des 15 bâtiments par classe énergétique.

Le parc C (distribution logarithmique) est le parc le moins performant, il contient une grande majorité de passoires énergétiques. Juste après lui les parcs A (linéaire) et D (sigmoïde) sont toujours constitués de plus de 50% de passoires énergétiques. Les parcs B (exponentiel) et E (social) sont constitués d'un stock moins important de bâtiments non-performants. Le parc social réel est même nettement le parc le plus performant à être considéré dans cette analyse, il est par ailleurs le seul à compter des bâtiments dans les classes énergétiques supérieures (~5% d'étiquettes B).

2.1.2. Valeur verte (VV)

Le paramètre VV incarne, en SC0, l'activation (la prise en compte) dans le modèle des impacts de la performance énergétique des bâtiments sur leur attractivité et donc celle du parc. Ainsi notre analyse des impacts de VV en SC0 explore-t-elle la sensibilité de MACARON à l'attractivité du parc, pour une configuration de PP donnée. L'intérêt de l'analyse de sensibilité à VV est ici d'éclaircir le lien entre performance énergétique, attractivité et vacance des logements. L'externalité de valeur verte représente dans MACARON une externalité économique intangible, représentative de l'importance croissante de la performance énergétique dans les critères de logement des usagers.

VV joue un rôle majeur dans le modèle MACARON. Cette variable contribue de façon significative à la relation entre les niveaux MICRO et MESO du fait de son rôle dans l'incitation à une meilleure performance énergétique. À ce titre, elle constituera même dans des développements ultérieurs un lien important d'un modèle global incluant les niveaux NANO et MACRO.

L'étude (DINAMIC, 2015) des Notaires de France présente les plus-values et moins-values réalisées par les propriétaires privés à la vente de leur bien en fonction de leur étiquette énergétique. Nous nous sommes approprié les résultats de cette étude pour exprimer la valeur verte sous forme de coefficient d'attractivité. Ces coefficients seront positifs (respectivement négatifs) pour des étiquettes supérieures (respectivement inférieures) à l'étiquette de référence (étiquette D). La méthode employée est présentée en annexe 1. La Figure 49 page suivante présente l'allure des coefficients d'attractivité des classes énergétiques A- à G+ appliqués dans MACARON selon notre appropriation des résultats de l'étude (DINAMIC, 2015). Les coefficients d'attractivité ont été différenciés selon la zone climatique (H1, H2 ou H3).

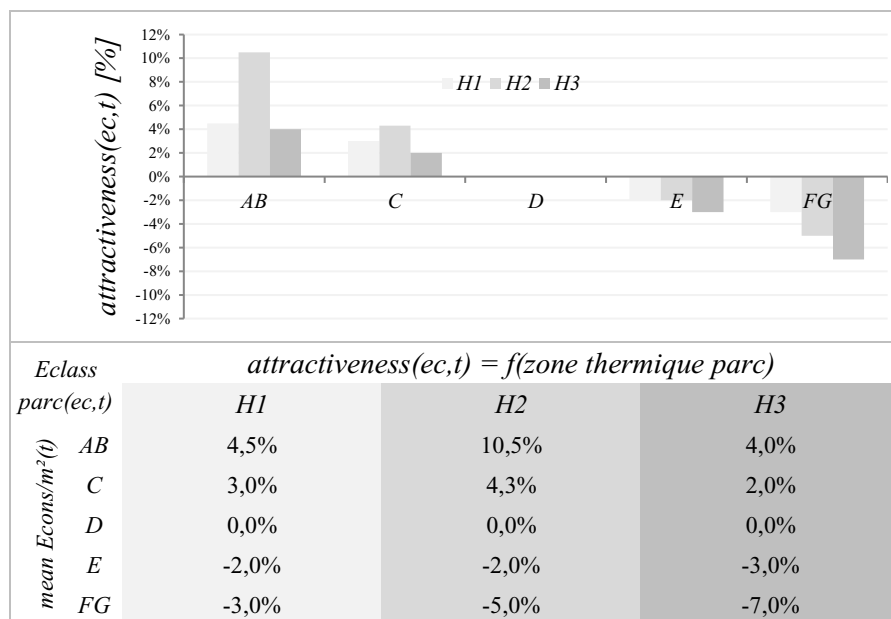


Figure 49. Coefficients d'attractivité appliqués dans MACARON (cf. annexe 1).

La valeur verte a également d'autres impacts économiques⁶⁰ à travers le modèle mais ceux-ci n'interviennent que lors des rénovations (hors scénario de référence, donc). On étudiera l'impact de la performance initiale du parc sur le cumul de dépenses énergétiques et de dépenses financières. On observera ainsi le taux d'occupation du parc en fonction de la prise en compte de la valeur verte, et son impact sur les revenus. On s'appuiera pour cela sur des données statistiques historiques pour décrire en projection les dynamiques globales d'occupation du parc à l'horizon de simulation. L'INSEE⁶¹ évalue en effet le taux de vacance du parc français à 8,87% de l'ensemble du patrimoine résidentiel en 2018, et son taux de progression annuel (constaté depuis 2010) à +3,4% par an.

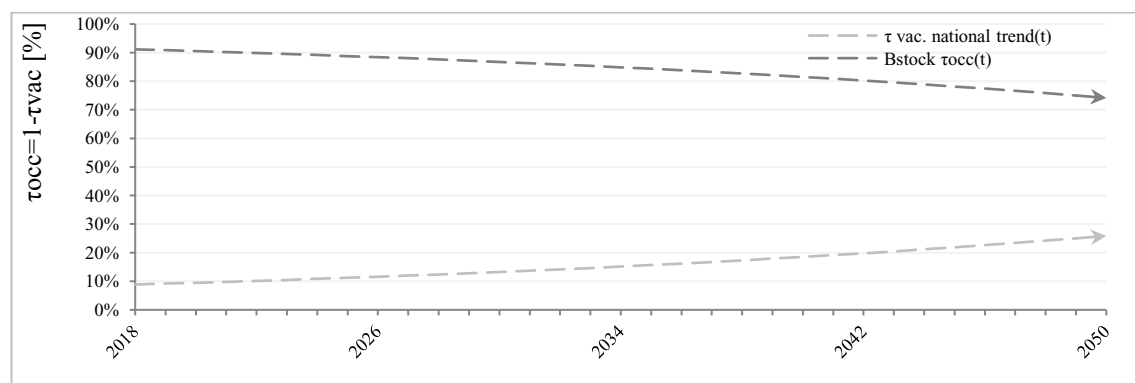


Figure 50. Comportement de référence $\tau vac national trend(t)$: augmentation annuelle du taux de vacance national selon les chiffres INSEE (2018) ; Taux d'occupation du parc $\tau occ(t)$ en situation de référence : le taux d'occupation du parc est soumis aux dynamiques de vacance constatées sur le territoire.

Note : Ces chiffres concernent l'ensemble du parc à échelle nationale. Sont donc contenus dans ces taux tous les types de logements individuels et collectifs.

Les dynamiques d'occupation des logements de propriétaires particuliers sont ainsi très spécifiques. L'augmentation progressive du nombre de résidences secondaires, faiblement occupées, sur le territoire engendre une augmentation mécanique du taux de vacance à échelle nationale. Le taux de progression annuel de +3,4% pourrait donc varier sur l'horizon de temps considéré. En l'absence de

⁶⁰ VV possède deux types d'impacts dans MACARON. Notre adaptation de VV en tant qu'externalité économique tangible (VV') sera déclinée en SC4.

⁶¹ Dossier imprimable <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3572689>.

considérations plus abouties sur cette question, c'est ce taux, constant, ce qui a été retenu dans MACARON en première approche.

Les coefficients d'attractivité, nous l'évoquions plus haut, agissent sur la dynamique d'évolution du taux de vacance (+3,4%) et non directement sur le taux de vacance (8,87%). Ainsi, la décroissance du taux d'occupation du parc est soit accélérée par un coefficient d'attractivité négatif (effet répulsif des passoires énergétiques), soit ralentie au contraire par une attractivité positive (générée par les bâtiments performants).

Le paramétrage de VV permet de représenter trois cas de figure dans l'analyse de l'impact de la valeur verte sur les dynamiques d'occupation des logements :

- Le premier considère qu'il n'y a aucun impact des coefficients d'attractivité sur l'occupation des bâtiments. Le parc suit les mêmes dynamiques de vacance que le parc national et il n'est nullement tenu compte de son caractère répulsif ou attractif d'un point de vue énergétique.
- Le deuxième cas de figure intègre les coefficients d'attractivité tels que déduits de l'étude (DINAMIC, 2015) des Notaires de France (cf. annexe 1).
- Le troisième cas de figure envisage une prise de conscience collective et massive en faveur de la performance énergétique. Les coefficients d'attractivité/répulsion sont, par hypothèse, quadruplés dans le calcul du taux d'occupation du parc.

Dans MACARON, VV peut ainsi prendre la valeur 0, 1 ou 4. Les équations de $\tau_{occ.(b,t)}$ en fonction du paramétrage de VV sont présentées en Table 40 ci-dessous.

Table 40. Paramétrage de VV : équations de $\tau_{occ.(b,t)}$ et impacts de $attractiveness(b,t)$.

	Valeur Verte (VV)	Éq.
VV0	Le coefficient de valeur verte n'impacte pas le taux de vacance du bâtiment : $\tau_{occ.(b,t)} = 1 - (\tau_{vac.national\ trend(t)})$	37
VV1	Le coefficient de valeur verte attribué à chaque bâtiment à l'aide de son étiquette énergétique, pondère le taux de vacance du bâtiment à travers le coefficient d'attractivité : $\tau_{occ.(b,t)} = 1 - (\tau_{vac.national\ trend(t)}) \times (1 - attractiveness(b,t))$	38
VV4	L'attractivité générée par le coefficient de valeur verte est multipliée par 4, représentant une revalorisation significative de l'actif énergétique et une prise de conscience des individus : $\tau_{occ.(b,t)} = 1 - (\tau_{vac.national\ trend(t)}) \times (1 - 4 \times attractiveness(b,t))$	39

2.1.3. Valeur Locative (VL)

Le paramètre VL, Valeur Locative (prix par unité de surface de logement), représente la contrainte de revenus locatifs dans l'évaluation de la capacité financière de l'organisation. Il est convenu que la capacité financière est un facteur fortement limitant dans le processus d'amélioration énergétique : un manque de moyens financiers peut en effet induire un report des investissements, et donc de la transition énergétique du parc.

VL est fortement sensible à la localisation du parc. En France, la valeur locative des logements par unité de surface peut par exemple varier du simple au quadruple en fonction de leur situation géographique départementale. Ce phénomène se manifeste également à des échelles plus restreintes, à l'intérieur d'une même zone comme un quartier où une ville. Complexes à appréhender, ces dynamiques sont à l'origine de nombreuses études contemporaines sur les bassins de vie, la polarité

des espaces urbains etc., lesquelles témoignent de l'intérêt de questionner ce type de flux dans notre appréhension du cycle de vie du patrimoine bâti.

La valeur locative des logements est en outre fortement réglementée en termes d'augmentation et de plafonds. On s'affranchira, en SC0, de toutes ces considérations que MACARON n'a pas vocation à explorer plus avant. Notre travail ici consistera plutôt à faire émerger une tendance sur l'ampleur de la contrainte financière qui s'exerce sur l'organisation en fonction de l'ordre de grandeur de la valeur locative (revenus) qui lui est imposée par les marchés de l'immobilier et du logement. On suppose en effet que si les revenus sont dépendants de la localisation, et pas les dépenses, alors la contrainte de capacité financière qui s'applique sur l'organisation est d'autant plus importante que les revenus sont limités par les dynamiques de marché local. On s'appuie pour cela sur les données produites par l'Association CLAMEUR⁶², qui présente un état des lieux fourni des tarifs pratiqués sur le marché locatif français à différentes échelles spatiales. L'échelle départementale, plutôt que régionale, est retenue pour que puisse être fait le lien entre départements et zones thermiques, ces dernières ne correspondant pas exactement au découpage des régions.

Dans une première approche, on retient de cette étude trois valeurs contrastées. L'objectif est d'étudier dans quelle mesure une variation significative de VL peut impacter la capacité financière du gestionnaire. On s'intéressera là encore à la variation relative de cette capacité financière.

On attribue ainsi à VL une valeur N, Y ou X, dont les équivalents numériques sont présentés en Table 41 ci-après. N, Y et X représentent :

- N (miN) le bas de la fourchette des prix pratiqués à échelle départementale.
- Y (moY) la valeur locative médiane constatée à échelle départementale (porte son nom par pure mesure mnémotechnique).
- X (maX) la valeur maximale constatée dans les prix pratiqués à échelle départementale.

Table 41. Montants (fourchettes des tarifs départementaux) de VL (X, Y, N) d'après l'Association CLAMEUR.

Valeur locative (VL)	
N = miN	6,30 €/m ²
Y = moY*	10,70 €/m ²
X = maX	25,20 €/m ²

*moY= **médiane** (9,14€/m² si moyenne)

2.2. Sensibilité à la stratégie de rénovation : SC1

Dans notre vision du système numergétique, détaillée au chapitre 3, nous considérons que la stratégie de rénovation énergétique relevait à la fois de l'évolution de l'environnement normatif du système, et de la position du décideur au regard de la question environnementale. Ce scénario adresse des questions telles que :

- Quelles sont les stratégies énergétiques les plus efficaces sur un plan énergétique ?
- Qu'en est-il de leurs pendants financiers et humains ?
- Quel surinvestissement global d'une démarche proactive ?

Ainsi le scénario SC1 envisage-t-il la stratégie de rénovation sous deux aspects :

- L'aspect réglementaire est représenté par le paramètre RT. Il traduit l'évolution des normes et réglementations au cours du temps en matière de rénovation énergétique des bâtiments. On considère que le décideur peut choisir de les suivre, ou non. Le cas échéant il ne peut qu'adopter une démarche proactive, ses objectifs énergétiques ne pouvant en aucun cas être inférieurs à ceux de la réglementation.
- La décarbonation du parc, incarnée par le paramètre MIX, analyse l'impact de la rénovation du mix énergétique des bâtiments sur la contrainte de capacité financière de l'organisation.

⁶² Les loyers de marché 2018 : <http://www.clameur.fr/Tendances-du-marche/Tendances-departementales/Les-loyers-de-marche>.

Pour l'instant, au regard du contexte national, MIX n'est dans MACARON soumis à aucune réglementation et relève entièrement de la politique énergétique du gestionnaire.

La Table 42 ci-dessous présente la synthèse des configurations de MACARON qui seront explorées en SC1. Les sous-sections suivantes détaillent le paramétrage de RT et MIX.

Table 42. Cartographie des configurations SC1.

1-E1Y-RT-MIX

SC 1	REFERENCE				ENERGIE			NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE							
	PP	VL			RT	MIX			FORM	LOD						TO	MAT		DER	VV			
		X	Y	N		I	E	R		0	1	2	3	4	5		1	2		M	N	P	
	VV	4	1	0	8	5	1	1	0	5	2	0	2	1	5	2	0	2	1	5	2	0	
●	paramètres actifs : test des configurations du SC en cours																						
●	paramètres actifs : selon configurations retenues																						
■	paramètres désactivés																						

2.2.1. Réglementation Thermique pour la rénovation (RT)

Le paramètre RT représente la manière dont les exigences de la réglementation thermique en vigueur et celles du décideur pourraient se renforcer au cours des décennies à venir. Ces travaux analysent trois cas de figure. Deux d'entre eux concernent le cas où le décideur se conforme aux exigences réglementaires. Le troisième représente le cas où il s'en affranchit, dans une démarche proactive : il va au-delà. Les deux premiers cas considèrent deux chemins potentiels de renforcement des réglementations (augmentation du niveau d'exigence dans le temps, à des rythmes distincts d'un chemin à l'autre). Le troisième engage un niveau d'exigence constant, relativement élevé. Chacun de ces trois chemins de transition engage des exigences spécifiques à la fois en ce qui concerne les demandes de rénovation (courbes discontinues en Figure 51 ci-dessous) et les objectifs énergétiques visés par celles-ci (courbes continues en Figure 51).

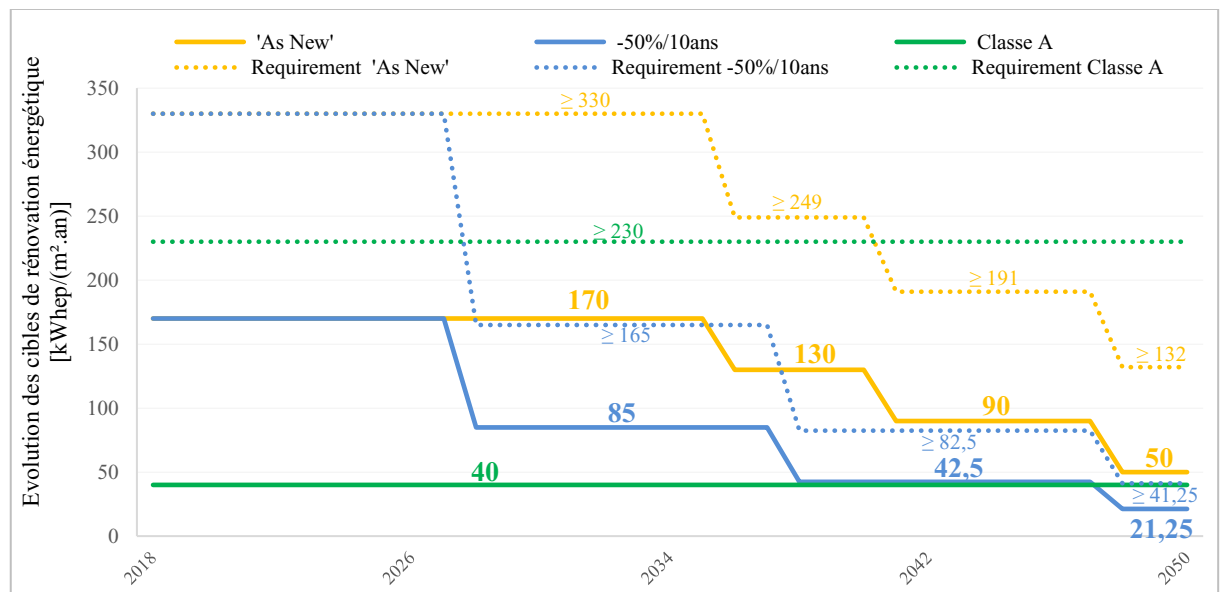


Figure 51. Évolution des exigences réglementaires/internes: synthèse des politiques énergétiques RT.

La première configuration – baptisée « As New / Neuf » (9) – consiste en une extrapolation des évolutions réglementaires pour la construction neuve entre 1974 et 2018. Elle en reprend le principe et la valeur des sauts imposés aux performances réglementaires.

Construit selon le même principe, le deuxième chemin suit une dynamique différente, fondée sur une règle mathématique simple de division par un facteur 2 des niveaux réglementaires tous les 10 ans. Cette configuration est ainsi nommée « -50%/10ans » (5).

Le troisième chemin illustre ce que pourrait être une démarche proactive du décideur. Au contraire des deux autres chemins, celui-ci considère une contrainte et un objectif de rénovation constants dans le

temps, dimensionnés de sorte à témoigner d'un engagement énergétique fort et *a priori* plus ambitieux que dans les autres stratégies. Parce que cette stratégie vise, en termes d'objectifs de rénovation, l'intérieur de la classe A, on appellera par la suite cette configuration « Classe A » (1).

La politique énergétique de rénovation du décideur est considéré comme un invariant au cours de la simulation. C'est un intrant qui n'est pas impacté par les rétroactions du modèle.

Par ailleurs, ce choix initial d'un scénario de rénovation illustre des stratégies tant du législateur que du décideur. Il s'applique donc par hypothèse à tous les bâtiments sans distinction.

2.2.2. Rénovation du mix énergétique (MIX)

Dans MACARON, la rénovation du mix reflète une stratégie de rénovation parallèle qui n'a d'influence ni sur les objectifs de rénovation explicités ci-dessus ni sur leur renforcement. La décarbonation du parc, aussi rencontrée sous le terme de fuel switch en anglais dans d'autres travaux (Branger, 2015) aura en fait un impact sur le coût des rénovations (qu'elle fait augmenter sans améliorer l'indice de performance du bâtiment rénové) et sur les consommations en énergie primaire/finale à l'introduction des énergies vertes (renouvelables) sur le parc.

MACARON propose dans ces travaux trois options de rénovation du mix énergétique des bâtiments.

- La première n'intègre pas la rénovation du mix dans la stratégie de rénovation du décideur ; cette alternative sera notée I, mix Inchangé.
- La deuxième comprend dans la stratégie de rénovation du parc la mutation du mix énergétique des bâtiments rénovés vers un mix énergétique 100% électrique ; cette alternative sera notée E, mix Électrique.
- La troisième option comprend dans la stratégie de rénovation du parc la mutation du mix énergétique des bâtiments rénovés vers un mix énergétique 100% renouvelable, de type électricité verte⁶³ ; cette alternative sera notée R, mix Renouvelable.

La Table 43 synthétise les proportions des différentes énergies, dans les mix énergétiques initial/rénové des bâtiments du parc, pour les différentes configurations de MIX.

Table 43. Configurations de MIX (Inchangé, Électrique, Renouvelable).

Rénovation des mix énergétiques des bâtiments (MIX)	
<i>Inchangé</i>	
I	Pas de rénovation du mix énergétique des bâtiments, qui reste à l'état initial : $MIX I(en)^{64} = (21\% ; 79\% ; 0\%)$
<i>Électrique 100%</i>	
E	Rénovation du mix énergétique des bâtiments vers 100% énergie fossile électricité : $MIX E(en) = (100\% ; 0\% ; 0\%)$
<i>Renouvelable 100%</i>	
R	Rénovation du mix énergétique des bâtiments vers 100% énergie verte : $MIX R(en) = (0\% ; 0\% ; 100\%)$

2.3. Sensibilité à la stratégie de déploiement du BIM : SC2

L'intérêt du BIM, et de la transition numérique, est évalué au regard du niveau de performance atteint par la stratégie énergétique seule, traitée en SC1. Une des hypothèses fondamentales de MACARON est que l'intérêt du BIM et sa participation à l'amélioration énergétique du parc peuvent varier en fonction du niveau de détail choisi pour la numérisation des bâtiments (que nous avons appelée intensité de numérisation, le LOD). Le LOD est en effet présenté dans la littérature comme ayant différents niveaux de coûts et d'avantages en fonction du contenu de données qu'il représente

⁶³ D'autres variantes 100% renouvelable (biomasse, réseau de chaleur sur chaufferie bois, ...) pourraient être envisagées.

⁶⁴ Indice énergie : en=(elec,gaz,renouvelable).

(détail en chapitre 3). On cherchera ici à connaître l'ampleur des effets provoqués par la numérisation du parc et adresserons les questions suivantes :

- La numérisation permet-elle de renforcer ou au moins de maintenir la performance énergétique atteinte sans BIM en SC1 ?
- Si elle est facteur d'amélioration, quel(s) gain(s) relatif(s) permet-elle de réaliser ?

La seconde hypothèse que nous testerons dans ce scénario concerne les enjeux de la formation des effectifs. On postule en effet que différents niveaux de numérisation (LOD) réclament d'autant plus de compétence BIM que le LOD est élevé. Dès lors on souhaite formaliser l'impact de la politique de formation des effectifs (FORM) :

- Est-elle un facteur critique dans le maintien de la capacité financière de l'organisation ?
- Quelle(s) conséquence(s) provoque-t-elle sur le volume des flux de travail, de gestion de données ?
- Quelle(s) conséquence(s) peut-elle avoir sur la performance énergétique et la non-qualité des travaux de rénovation ?

La Table 44 ci-dessous présente la synthèse des configurations de MACARON qui seront explorées en SC2. Les sous-sections suivantes détaillent le paramétrage de LOD et FORM.

Table 44. Cartographie des configurations SC2.

2-EIY-5I-FORM-LOD

SC 2	REFERENCE			ENERGIE			NUMERIQUE							RESS. HUMAINES		ECONOMIE																						
	PP	VL			MIX			LOD							MAT		VV																					
		X	Y	N	I	E	R	0	1	2	3	4	5	1	2	M	N	P																				
	VV	4	1	0				RT	3	5	1				FORM	1	0							TO	5	2	0					DER	2	1				

- paramètres activés : test des configurations du SC en cours
- paramètres activés : selon configurations retenues
- paramètres désactivés

2.3.1. Stratégie de numérisation (LOD)

Le déploiement du BIM n'est dans MACARON imposé par aucune réglementation et relève entièrement de la politique interne du décideur pour la numérisation du parc. Seules les formations BIM font l'objet dans ces travaux de recommandations officielles (détaillées à la sous-section suivante) auxquelles le décideur n'a pour autant pas l'obligation de se conformer.

L'hypothèse fondamentale qui sous-tend le fonctionnement du modèle dans le déploiement du BIM est que les contenus de données varient d'un LOD (niveau de détail, intensité de la numérisation des bâtiments) à l'autre tel que présenté en annexe 1.

Une autre hypothèse importante est que les LOD les plus faibles contiennent les données les plus stables dans le temps, ce qui implicitement induit dans notre raisonnement que les LOD plus élevés représentent des cadences de mise à jour des données plus importantes : à titre d'exemple, un LOD100 contient la géolocalisation du bâtiment et son emprise au sol, voire son volume. Ces informations sont d'une grande importance pour le gestionnaire de patrimoine, et n'ont que peu de chance de varier dans le temps (sauf cas d'extension, hors scope de ces travaux). *A contrario* certaines données très spécifiques permettent une connaissance et un suivi très poussés du bâtiment mais demandent un effort considérable en termes d'actualisation des données : on pense à titre d'exemple à un attribut de type « coordonnées du fournisseur », une telle information n'est réellement utile que très ponctuellement, peut être très changeant dans le temps en fonction de l'élément considéré et demandera donc une grande rigueur dans la maintenance du système d'information.

C'est la rencontre de ces considérations qui nous permet de formuler ci-dessous un certain nombre d'hypothèses secondaires pour déterminer le volume des contenus de données, leur utilité et adéquations aux besoins du gestionnaire, leur coût d'acquisition et de traitement, ou encore le rythme d'obsolescence prévisible des contenus de données. On tient compte de ces particularités dans la détermination du coefficient d'adéquation du LOD aux activités de GPI : c'est ce qui explique que l'on ait considéré qu'un LOD100 assure 52% des fonctions attendues du Système d'Information (SI).

Un LOD500, en dépit des difficultés de gestion qu'il soulève, est en revanche considéré comme parfait pour les activités de GPI en cela qu'il contient toutes les données potentiellement utiles en gestion locative ou patrimoniale. Le calcul des données présentées en Figure 52 ci-dessous est détaillé en annexe 1.

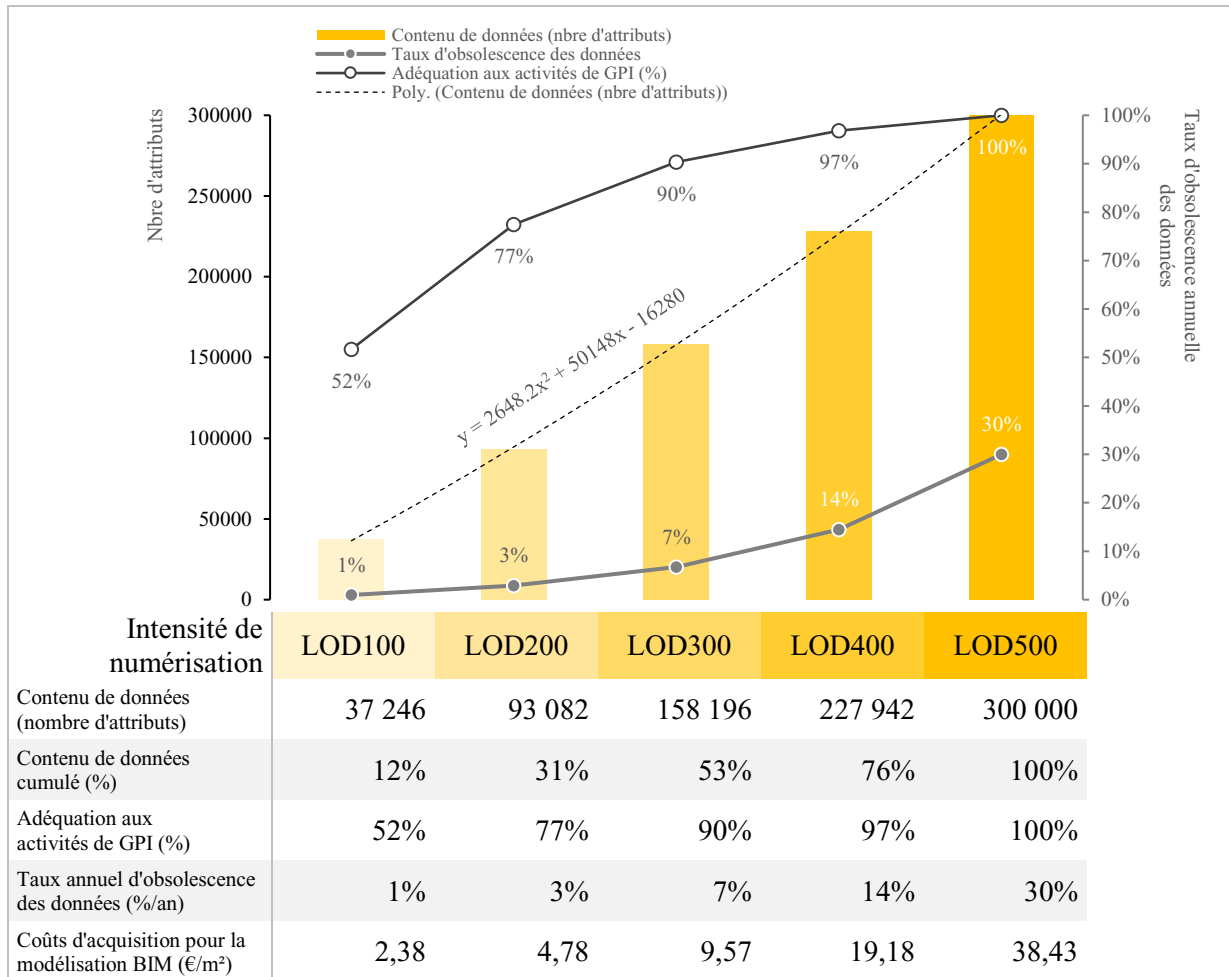


Figure 52. Données caractéristiques des LOD : contenus de données, adéquation aux activités, obsolescence des données et coûts de modélisation.

Dans MACARON le BIM est déployé au même LOD pour tous les bâtiments du parc (choix initial d'un scénario de numérisation). Les modèles de données (modèles BIM) sont renouvelés en même temps que les bâtiments, toujours au LOD initial choisi dans le scénario de numérisation (la progressivité du LOD sera discutée en chapitre 8).

2.3.2. Politique de formation (FORM)

Le paramètre FORM représente la politique interne du décideur en matière de formation à la compétence BIM. Les dynamiques de formation ont dans MACARON deux impacts prévisibles majeurs : la diminution de la capacité financière générée par les dépenses de formation BIM (sont-elles compensées par la régression de la non-qualité sur le parc ?) et la diminution des flux de travail disponibles en interne (engendre-t-elle des surcoûts significatifs d'externalisation ?). Ces travaux analysent deux cas de figure :

Dans le premier cas, le décideur applique les préconisations en matière de formation BIM (

- Les hypothèses de coûts et durées des formations BIM sont détaillées au chapitre 5 (Table 33 p.148).

2.4. Sensibilité à l'environnement BIM : SC3

Le numérique progresse extrêmement vite, et l'intérêt des communautés scientifique et opérationnelle pour l'outil laisse à penser que le développement du BIM va aller bon train. Mais, à quel horizon temporel ? Quel sera le rythme de résorption des « défauts » du BIM ?

Table 45. Cartographie des configurations SC3.

SC 3	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE							RESS.HUMANES				ECONOMIE											
	PP		VL		MIX I E R				LOD 0 1 2 3 4 5							MAT 1 2				VV M N P											
	X	Y	N																												
	VV	0	1	0	RT	9	5	1	FORM	1	0	T0	5	2	0	DER	2	1													

- paramètres activés : test des configurations du SC en cours
- paramètres activés : selon configurations retenues
- paramètres désactivés

Le paramètre MAT représente l'évolution prévisible de la maturité technologique du BIM. D'après (Köhler et al. 2018), « *les transitions se produisent sur des périodes de temps au cours desquelles le changement se produit plus rapidement ou plus lentement. Un schéma archétypique est celui d'une courbe en S, dans laquelle le taux de changement est initialement lent, puis accélère et ralentit à nouveau à mesure que la nouvelle configuration du régime se stabilise.* » Nous avons approché cette question comme Köhler et Rogers : l'introduction d'une transition se fait par une sigmoïde (courbe d'adoption en S, « maturité marché 100% » = 100% des parts de marché). De manière générale, et dans notre cas plus particulièrement, une telle courbe représente le fait que les développements sont plus rapides et efficaces au début. Sont résolus en priorité les problèmes majeurs (d'interopérabilité par exemple) jusqu'au point d'inflexion à partir duquel les évolutions sont plus lentes.

Décembre 2019

- Horizon rapproché : la première option (MAT 1) considère une pleine maturité des outils, processus et technologies BIM à la date « PTNB+10 ans » soit 2025.
- Horizon lointain : la seconde option (MAT 2) considère une pleine maturité des outils, processus et technologies BIM à la date « PTNB+25 ans » soit 2040.

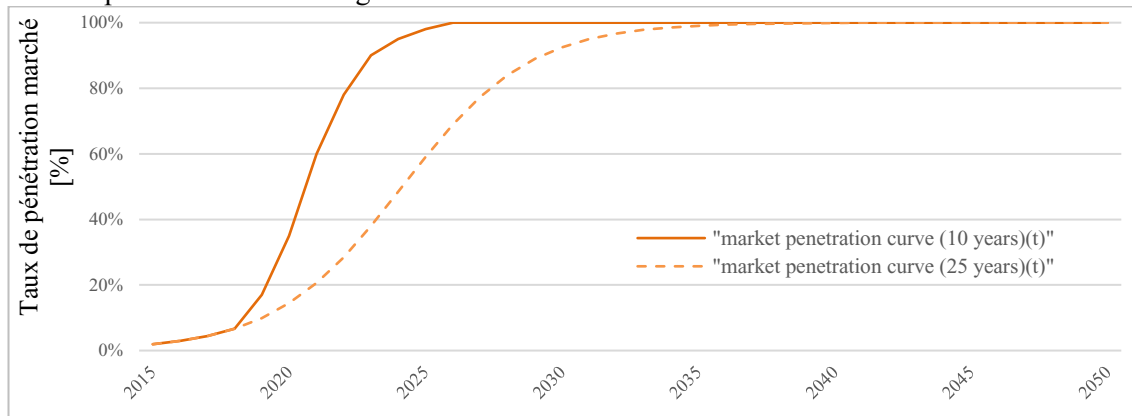


Figure 53. Maturité du BIM : courbes de pénétration marché.

La maturité technologique du BIM et des outils associés a un impact direct sur l'obsolescence de la qualification BIM du gestionnaire et sur sa capacité d'apprentissage organisationnel. Si les formations ne sont pas actualisées régulièrement, MACARON considère en effet que les progrès techniques du BIM (interopérabilité des formats, nouvelles fonctionnalités etc.), ne sont pas assimilés par les équipes de travail, impactant le travail collaboratif et la maîtrise des outils numériques en interne.

2.4.2. Date de déploiement du BIM (T0)

Shumpeter, Rogers, Gartner, Kubler-Ross et de nombreux autres chercheurs notamment en sciences des transitions (Geels et al., 2017; Köhler et al., 2018; Papachristos, 2019) se sont penchés sur les dynamiques caractéristiques du changement, de l'évolution technologique ou de l'innovation. Le paramètre temps tel qu'il est traité par ces théories, met en évidence le caractère opportuniste que revêt toute stratégie d'adoption ou de déploiement d'une innovation. Existe-t-il une date « propice » pour déployer les processus BIM ? Le paramètre T0, date de déploiement du BIM, reflète dans MACARON cette question de l'opportunité du numérique et de sa variation dans le temps à travers la modélisation de trois stratégies distinctes d'implémentation :

- La première stratégie fait l'hypothèse d'une démarche numérique proactive, laquelle consiste à déployer le BIM « au plus tôt » soit à T0=2018 début de la simulation.
- Le deuxième cas de figure représente le cas du décideur « sensibilisé à l'échéance du Plan BIM 2022 » et met en œuvre le déploiement du BIM à T0=2022.
- Le troisième et dernier cas envisage le déploiement numérique « quand l'environnement BIM s'y prête » et considère une date de déploiement fonction de la maturité technologique du BIM, telle que $T0=f(50\% \text{ MAT})$.

On cherchera à caractériser, en SC3, l'ampleur des effets combinés de MAT et T0 sur le coût global de l'exploitation du parc numérisé.

2.5. Sensibilité à l'environnement énergétique : SC4

Le scénario SC4 analyse l'impact de la rencontre des conjonctures économiques suivantes :

- la hausse progressive du prix des énergies non-renouvelables associée à la raréfaction des ressources planétaires ;
- la baisse du prix des énergies non-fossiles due à l'intérêt et au développement accrus des ENR dans le paysage énergétique français ;
- l'ambivalence des dynamiques de coûts d'exploitation pour maintenir la performance énergétique (la haute performance engendre-t-elle des économies ou des surcoûts d'exploitation ?)

Le paramètre DER introduit dans MACARON l'évolution du prix des énergies fossiles et leur dérive potentielle dans le temps et VV' l'impact de la valeur verte sur les coûts de maintenance (moins,

neutre, plus – M,N,P). Dans ce scénario on s’attend à des impacts principalement économiques de la valeur verte (externalité économique de performance énergétique) et de la dérive du prix des énergies sur le coût global d’exploitation du parc et la capacité financière de l’organisation. DER et VV’ ont-ils un impact significatif sur la rentabilisation des investissements ? L’impact de la valeur verte sur les coûts de maintenance contraint-il la faisabilité financière des investissements numergétiques ? La Table 46 ci-dessous présente la synthèse des configurations de MACARON qui seront explorées en SC4. Les sous-sections suivantes détaillent le paramétrage de DER et VV’.

Table 46. Cartographie des configurations SC4.

4-EIY-5I-1(0.2.3.4)-21-DER-VV'

SC 4	REFERENCE				ENERGIE			NUMERIQUE							RESS. HUMAINES	ECONOMIE																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	PP	VL			MIX	I	E	R	FORM	1	0	0	1	2	3	4	5	T0	5	2	0	1	2	DER	2	1	M	N	P																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		X	Y	N																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	VV	4	1	0	RT	9	5	1																						0	0	1	2	3	4	5	2	1	2	3	4	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

2.5.1. Dérive du prix des énergies (DER)

MACARON envisage deux scénarios potentiels de dérive du prix des énergies :

- Le premier scénario voit le prix en [€/kWh_{ef}] d’énergie fossile augmenter de 1% chaque année ; inversement le prix en [€/kWh_{ef}] d’énergie verte diminue quant à lui de 1% chaque année (Éq.40 en Figure 54 ci-dessous).
- Le second scénario (renforcement du scénario 1) voit le prix en [€/kWh_{ef}] d’énergie fossile augmenter de 1% chaque année jusqu’en 2032, date à partir de laquelle il augmente de 2% chaque année (Éq.41 en Figure 54). Le prix en [€/kWh_{ef}] d’énergie verte diminue de même de 1% chaque année jusqu’en 2032, puis de 2% après 2032 (Éq.42 en Figure 54).

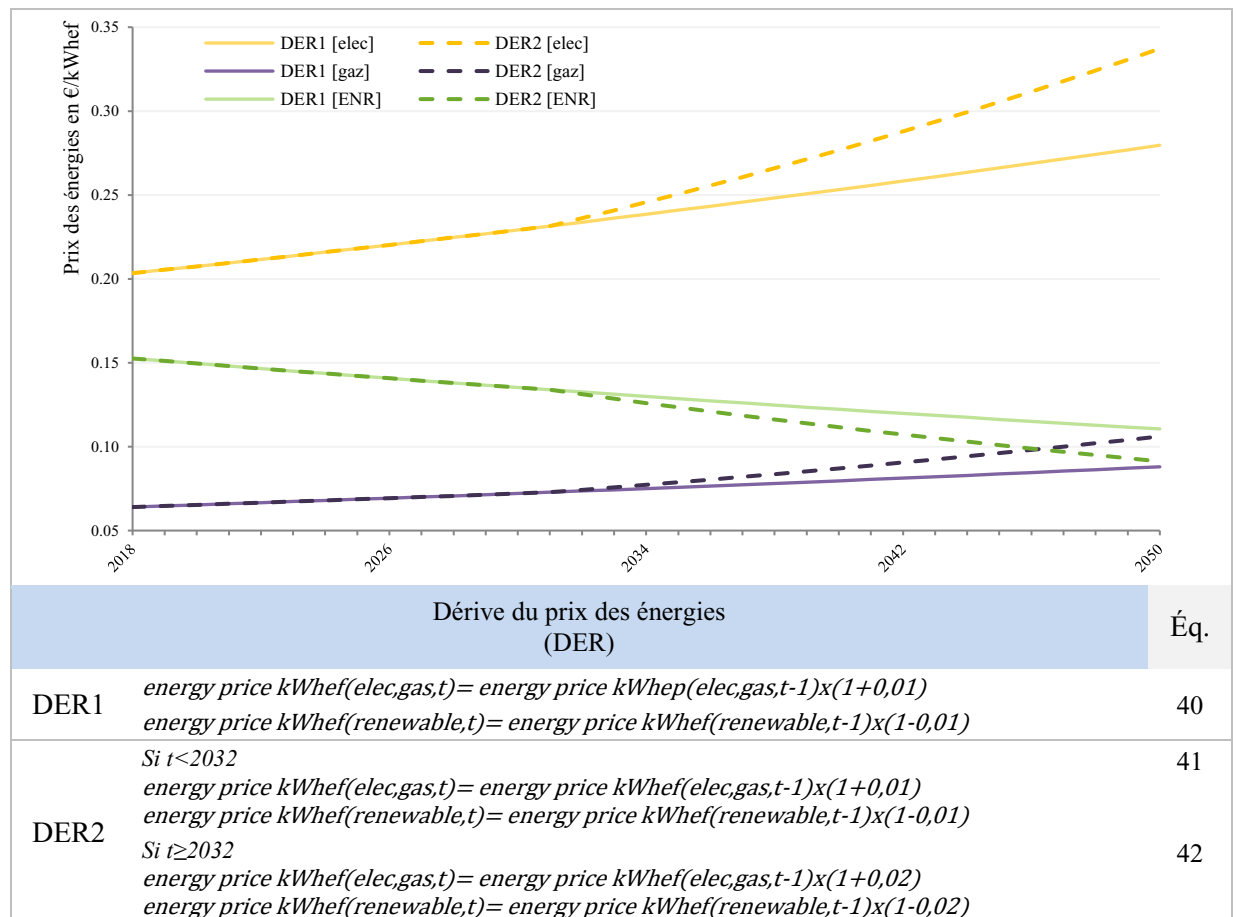


Figure 54. Dérive du prix des énergies.

2.5.2. Coût de la valeur verte en exploitation (VV')

Le paramétrage de VV' interroge l'impact de l'amélioration de la performance énergétique d'un ouvrage sur les coûts de maintenance ultérieurs aux opérations de rénovation. Plusieurs hypothèses peuvent être émises, lesquelles ne trouvent pas de réponse unanime dans la littérature.

Une première hypothèse consiste à postuler que les rénovations effectuées sur le parc peuvent simplifier les processus de maintenance, réduire les coûts d'entretien et ainsi permettre de réaliser des économies sur le coût global ultérieur d'un certain nombre de postes en exploitation. Une seconde hypothèse, correspondant par exemple à des rénovations à haut niveau de technicité, suggère que les dispositifs mis en œuvre lors des opérations peuvent au contraire engager des compétences, processus et/ou dépenses ultérieures plus importantes qu'avant rénovation, comme une fréquence accrue des périodicités de maintenance sur les éléments sensibles.

Le scénario SC4 a dès lors pour ambition d'explorer, à travers les différentes configurations de VV', les variations de la capacité financière de l'organisation et de la rentabilité des opérations de rénovation dans trois cas de figure :

- VV' = M : Moins
L'amélioration énergétique du bâtiment diminue les coûts de maintenance après rénovation (Éq.43 en Table 47 ci-dessous).
- VV' = N : Neutre
L'amélioration énergétique d'un ouvrage n'en affecte pas les coûts d'exploitation ultérieurs : aucun impact de VV' sur les coûts de maintenance après rénovation (Éq.44 en Table 47).
- VV' = P : Plus
L'amélioration de la performance énergétique du bâtiment augmente les coûts de maintenance après rénovation (Éq.45 en Table 47).

Table 47. Impact de la performance énergétique sur les coûts de maintenance (VV')

Valeur Verte' (VV')	Coûts de maintenance des bâtiments $Mcost(b,t) [€] =$	Éq.
VV'=M(oins)	$surf(b) \times 1530 \times Mcoeff(b,t) \times (1 - green\ value(b,t))$	43
VV'=N(eutre)	$surf(b) \times 1530 \times Mcoeff(b,t)$	44
VV'=P(lus)	$surf(b) \times 1530 \times Mcoeff(b,t) \times (1 + green\ value(b,t))$	45

Les valeurs de *green value(b,t)* sont présentées en annexe 1. Nos autres hypothèses de modélisation concernant les coûts de maintenance sont détaillées aux chapitres 4 et 5.

2.6. Comparaison de trois approches numergétiques contrastées : SC ELS

La Table 48 page suivante présente la synthèse des configurations de MACARON qui seront explorées en SC ELS. Alors que les scénarios 1 à 4 explorent les impacts de couples de paramètres, le scénario ELS considère en guise de synthèse les impacts agrégés de l'ensemble des paramètres ci-avant présentés. Ainsi l'association des différentes configurations paramétriques susmentionnées permet-elle la description de trois stratégies numergétiques contrastées :

- *Early Majority* : Politique numergétique très volontariste
Le décideur favorise la proactivité tant dans sa stratégie de rénovation que dans sa vision numérique de la transition numergétique du parc. Sa politique environnementale est désintéressée.
- *Late Majority* : Politique numergétique attentiste
Les décisions du gestionnaire ne traduisent ni réel désintérêt ni véritable engagement dans les questions énergétiques et numériques. Il favorise l'immobilisme quand cela est possible ou des objectifs peu ambitieux, dans le respect des préconisations expertes et réglementaires.
- *Skeptic* : Politique numergétique peu engagée

Le gestionnaire privilégie la procrastination voire l'inaction. Sa politique environnementale est orientée par les critères économiques, et fixe en conséquence des objectifs *a minima* lesquels s'affranchissent même de certaines contraintes non-réglementaires.

Table 48. Cartographie des configurations E, L et S (Early majority, Late majority, Skeptic).

E-E1Y-1R-14-01-2P

L-E1Y-5E-12-51-2N

S-E1Y-9I-01-21-2M

SC ELS	REFERENCE				ENERGIE			NUMERIQUE							RESS.HUMAINES			ECONOMIE						
	E	VL			MIX	I	E	R	LOD	0	1	2	3	4	5	MAT	1	2	VV	M	N	P		
		X	Y	N																				
		0	1	2																				
		3	4	5																				
PP	SC	4	1	0	RT	3	5	1	FORM	1	0						5	2	0	DER	2	1		
E : Parc social																								
S C																								
S																								

Le scénario d'exploitation ELS fait office de synthèse globale des résultats obtenus dans les présents travaux de thèse. On y examine les plages de performance (du parc, de l'organisation, en termes de coûts, de qualité et de délais) à attendre de ces alternatives comportementales.

3. Évaluation des résultats du modèle : éléments d'analyse QCD

D'après (Corbel, 2019), il existe de nombreuses manières d'évaluer la performance en gestion de projet. Selon lui quelle que soit la méthode considérée, « *Toute performance industrielle se mesure par 3 paramètres* :

- *La qualité d'une prestation et sa fiabilité dans le temps ;*
- *Le coût, sous toutes ses formes : coût de conception d'un produit, coût de logistique, coût de commercialisation, prix de vente d'un produit, etc. ;*
- *Le délai de conception comme de livraison.*

Un équilibre est ainsi à rechercher entre ces trois paramètres. Inversement, une opposition entre ces 3 paramètres n'a pas de sens. »

Le trilemme QCD (Qualité, Coût, Délai, Figure 55 page suivante) introduit dans cet ouvrage n'est pas sans rappeler un autre triangle devenu célèbre qu'est celui de la durabilité (Figure 56). La réflexion entamée dans ces travaux de thèse fait largement écho à ce type d'évaluation et aux thématiques rapportées par ces triptyques. Rappelons que notre modélisation vise à faire émerger les tendances de la gestion numergétique durable du parc de bâtiments (question de recherche traitée par les sous-modèles DN), laquelle considère la performance de l'amélioration énergétique du parc (module PE), l'évolution des processus internes de gestion patrimoniale (module RH) et la capacité financière de l'organisation gestionnaire (module CF).

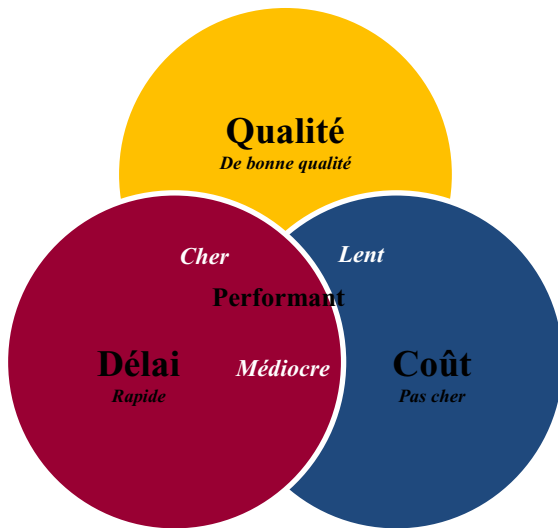


Figure 55. Trilemme Qualité-Coût-Délai

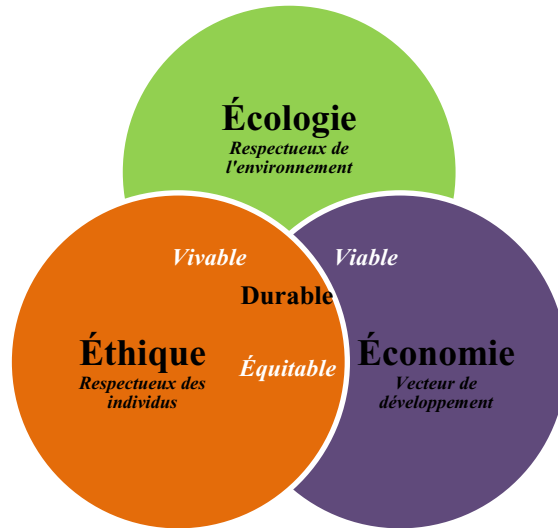


Figure 56. Triangle de la Durabilité

Note : le triangle QCD est bien un trilemme : les concessions à faire et les possibles déséquilibres sont explicitement représentés autour de la notion de performance. Exemple : plus le projet est rapide et pas cher, plus on suppose qu'il est de qualité médiocre, c'est la contrepartie. Le triangle de la durabilité quant à lui ne met en avant que les avantages : plus le projet est éthique et vecteur de développement économique, plus il est équitable, mais la contrepartie écologique n'est pas mentionnée. Le trilemme des 3E ou « trilemme de la Terre ⁶⁵ », se rapproche du triangle de la durabilité, mais c'est bien un trilemme : « *Le développement économique (E : économie) se fait par l'accroissement des dépenses énergétiques (E : énergie), ce qui entraîne des enjeux environnementaux (E : environnement) par l'émission de polluants.* ».

Sur le modèle des diagrammes de Venn ci-dessus, et en transposant les concepts de *qualité*, *coût*, *délai* et ceux d'*écologie*, d'*économie* et d'*éthique* à notre propre problématique, l'analyse des résultats de MACARON pourra ainsi être appréhendée sous la forme d'un trilemme.

C'est à travers ce prisme réflexif que sont sélectionnés les éléments (les variables) du modèle qui seront analysés dans les scénarios d'exploitation du modèle. En effet la complexité de notre objet d'étude limite presque mécaniquement l'analyse simultanée de tous les éléments du modèle ce qui implique de notre part de rationaliser le nombre de variables investiguées. Une grande attention a été portée dans le choix de ces éléments pour que :

- la répartition sur QCD mette en exergue les facteurs d'équilibre/d'opposition qui caractérisent les « tensions » entre PE, RH et CF ;
- le nombre d'éléments observés par scénario n'entravent pas la « lecture » des impacts conjoints potentiels du modèle, leur bonne compréhension (raisonnement incrémental) ;
- le déroulement des analyses de scénario rende compte de la complexification progressive de l'objet d'étude et des résultats obtenus.

La Table 49 page suivante présente la synthèse des variables traitées dans les analyses de sensibilité du modèle aux différents scénarios, lesquelles font l'objet du chapitre suivant.

⁶⁵Yoshiro Hamakawa, *New Energy Option for 21st Century*, Trilemma Council (CRIEPI).

Table 49. Tableau récapitulatif des indicateurs et variables investigués dans l'exploitation du modèle.

Élément du trilemme		Scénario d'exploitation					
		SC0	SC1	SC2	SC3	SC4	ELS
Qualité - Coûts - Délais							
Q	<i>Inventaire</i>	•	•				•
	<i>Consommations TWhep</i>	•					
	<i>Gains TWhep</i>		•	•	•		•
	<i>Gains TWhcumac(t)</i>		•	•	•		•
	<i>Qualité des rénovations</i>			•	•		•
	<i>Qualité des flux de données</i>			•	•		•
	<i>Qualification BIM</i>			•	•		
C	<i>Occupation</i>	•	•				
	<i>Non-qualité : Surcoût</i>			•	•		•
	<i>Capacité financière</i>	•	•	•	•	•	•
	<i>Coût d'un kWh cumac évité</i>					•	•
	<i>Consommation des ressources financières</i>		•	•	•	•	•
	<i>Temps de Retour Actualisé</i>					•	•
D	<i>Consommation des ressources humaines</i>		•	•	•		•
	<i>Non-qualité Retard</i>						•
	<i>Rénovations reportées</i>		•	•			•

4. Synthèse du chapitre 6

La page suivante recense et synthétise les scénarios et l'ensemble des configurations qui seront testés en analyses de sensibilité dans le chapitre suivant. L'ensemble des scénarios d'exploitation sera investigué conformément à la procédure d'analyse incrémentale proposée au paragraphe §1 du présent chapitre. Notre analyse des résultats du modèle s'articulera comme suit à l'intérieur de chaque section. On rappellera tout d'abord les configurations des paramètres investigués par le scénario en cours d'analyse et on détaillera les relations causales induites dans le modèle par l'activation de ces paramètres ainsi que les hypothèses de simulation utiles. Dans un deuxième temps, nous présenterons l'analyse détaillée des résultats du modèle au prisme du triangle QCD identifié au paragraphe §3 du présent chapitre tel que :

- Qualité : performance énergétique (type kWh évités)
- Coûts : performance économique (type €/m² rénové ; €/kWh évité) ;
- Délais : rendement opérationnel et productivité (type h/m²).

La synthèse des résultats obtenus nous amènera finalement à arrêter une configuration « de référence » du scénario en cours pour permettre l'analyse du scénario suivant. De cette manière nous révélerons progressivement au fil des scénarios et des paramètres testés les éléments de compréhension de la transition numergétique mis en lumière par notre modélisation. Nous suggérons au lecteur de se munir d'une impression de la page suivante.

BIM et Rénovation
Modélisation systémique de la Transition Numérétique en Gestion de Patrimoine Immobilier

Table 50. Tableau de synthèse des scénarios d'exploitation testés en chapitre 7.

SC 0-1-2-3-4-E-L-S		PP A-B-C-D-E	VV 0-1-4	VL X-Y-N
PARC SC0	0 : sans rénovation	A : Linéaire B : Logarithmique C : Exponentiel D : Sigmoïde E : Parc social	0 : sans impact 1 : impact simple 4 : impact quadruple (x4)	X : maX Y : moY N : miN
	1			
	2			
	3 : avec rénovation			
	4 E-L-S			
RENO SC1	RT 1-5-9		MIX I-E-R	
	1 : Classe A 5 : -50%/10ans 9 : As New - Neuf	I : Initial E : Électricité 100% R : Renouvelable 100%		
BIM SC2	FORM 0-1		LOD 0-1-2-3-4-5	
	0 : Formations 0% 1 : Formations 100%	0 : sans BIM – LOD0 1 : LOD100 2 : LOD200 3 : LOD300 4 : LOD400 5 : LOD500		
RH SC3	T0 0-2-5		MAT 1-2	
	0 : T0 = 2018 2 : T0 = 2022 5 : T0 = 50% MAT	1 : 100% MAT = 2025 2 : 100% MAT = 2040		
ECO SC4	VV' M-N-P		DER 1-2	
	M : Moins, VV' diminue les coûts de maintenance N : Neutre, VV' n'a pas d'effèt sur les coûts de maintenance P : Plus, VV' augmente les coûts de maintenance	1 : energy price(t) +1% (2018-2050) 2 : energy price(t) +1% (2018-2032) puis energy price(t) +2% (2032-2050)		
SC ELS	ELS (PP-VV-VL) - RT-MIX - FORM-LOD - T0-MAT - DER-VV'			
	Combinaisons variables des paramètres ci-dessus : E : Early Majority = (E1Y)-1R-14-01-2P L : Late Majority = (E1Y)-5E-12-51-2N S : Skeptic = (E1Y)-EI-01-21-2M			

PP	Profil de Parc
VV	Valeur Verte (attractivité)
VL	Valeur Locative
RT	Réglementation Thermique
MIX	Rénovation des MIX énergétiques
FORM	Stratégie de FORMation
LOD	Stratégie de numérisation
T0	Date de déploiement du BIM
MAT	Courbe de MATurité du BIM
VV'	Valeur Verte (coûts d'exploitation)
DER	DERive du prix de l'énergie
E	Early majority : volontariste
L	Late majority : intermédiaire
S	Skeptic : peu engagé

PP	Profil de Parc
VV	Valeur Verte (attractivité)
VL	Valeur Locative
RT	Réglementation Thermique
MIX	Rénovation des MIX énergétiques
FORM	Stratégie de FORMation
LOD	Stratégie de numérisation
T0	Date de déploiement du BIM
MAT	Courbe de MATurité du BIM
VV'	Valeur Verte (coûts d'exploitation)
DER	DERive du prix de l'énergie
E	Early majority : volontariste
L	Late majority : intermédiaire
S	Skeptic : peu engagé

CHAPITRE 7

EXPLOITATION DU MODELE

- Configuration testée
- Conditions initiales (hors analyse)
- PP A Linéaire
B Logarithmique
C Exponentiel
D Sigmoide
E Parc social
- SC ● Early majority
● Late majority
● Skeptic

SC 0	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE							
	VL				MIX				LOD						MAT		VV							
	X Y N				I E R				0 1 2 3 4 5						1 2		M N P							
	VV	1	0	4	RT	5	1	9	FORM	1	0						T0	2	0	5	DER	2	1	
SC 1	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE							
	VL				MIX				LOD						MAT		VV							
	X Y N				I E R				0 1 2 3 4 5						1 2		M N P							
	VV	1	0	4	RT	5	1	9	FORM	1	0						T0	2	0	5	DER	2	1	
SC 2	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE							
	VL				MIX				LOD						MAT		VV							
	X Y N				I E R				0 1 2 3 4 5						1 2		M N P							
	VV	1	0	4	RT	5	1	9	FORM	1	0						T0	2	0	5	DER	2	1	
SC 3	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE							
	VL				MIX				LOD						MAT		VV							
	X Y N				I E R				0 1 2 3 4 5						1 2		M N P							
	VV	1	0	4	RT	5	1	9	FORM	1	0						T0	2	0	5	DER	2	1	
SC 4	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE							
	VL				MIX				LOD						MAT		VV							
	X Y N				I E R				0 1 2 3 4 5						1 2		M N P							
	VV	1	0	4	RT	5	1	9	FORM	1	0						T0	2	0	5	DER	2	1	
SC ELS	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE							
	VL				MIX				LOD						MAT		VV							
	X Y N				I E R				0 1 2 3 4 5						1 2		M N P							
	VV	1	0	4	RT	5	1	9	FORM	1	0						T0	2	0	5	DER	2	1	

Page 179

Page 187

Page 199

Page 214

Page 226

Page 235

1. Scénario SC0 : PP-VV-VL

L'amélioration de la performance énergétique d'un parc est fortement soumise à la contrainte financière qui s'exerce sur l'organisation pour les investissements en rénovation. Ce niveau de contrainte financière relève notamment i) du montant des consommations à résorber sur la période considérée, ii) de la capacité financière pour les investissements lourds.

1.1. Paramètres PP-VV-VL et causalités simplifiées

Dans cette section MACARON explore l'impact de (PP), de (VV) et de (VL).

La Figure 57 et l'arbre des causalités en Figure 58 résument les configurations qui seront testées par le présent scénario SC0 et les causalités mises en jeu dans MACARON.

CODE : SC0 - PP VV VL

SC 0	REFERENCE			ENERGIE			NUMERIQUE						RESS. HUMAINES		ECONOMIE		
	VL			MIX			LOD						MAT		VV		
	X	Y	N	I	E	R	0	1	2	3	4	5	1	2	M	N	P
	1	0	•	•	•	•	1	0	•	•	•	•	1	0	•	•	•

• paramètres activés : test des configurations du SC en cours
 • paramètres activés : selon configurations retenues
 □ paramètres désactivés
PP A : Linéaire
 B : Logarithmique
 C : Exponentiel
 D : Sigmoïde
 E : Parc social

Figure 57. SC0 : Analyses de sensibilité PP-VV-VL.

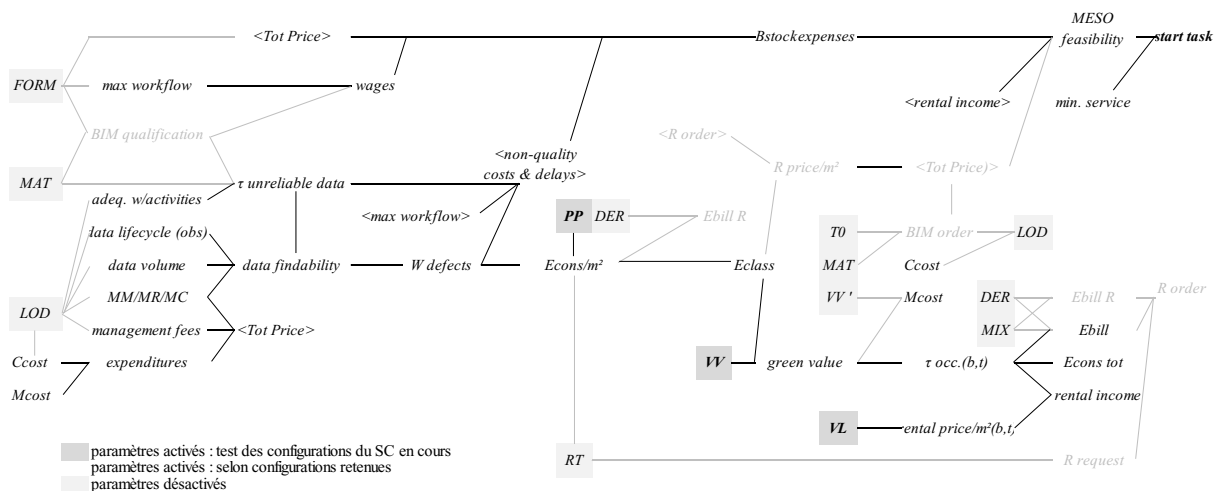


Figure 58. Arbre des causalités simplifié SC0.

La Table 51 page suivante donne les caractéristiques des configurations retenues pour la modélisation dynamique de PP, VV et VL dans MACARON.

Table 51. Caractéristiques des paramètres PP, VV et VL.

Profil de Parc (PP)	Valeur verte (VV)	Valeur locative (VL)
1 Linéaire (A)	0 $\tau_{occ.}(b,t) = 1 - (\tau_{vac.national\ trend}(t))$ (sans impact)	N 6,30 €/m ²
2 Logarithmique (B)		
3 Exponentielle (C)	1 $\tau_{occ.}(b,t) = 1 - (\tau_{vac.national\ trend}(t)) \times (1 - attractiveness(b,t))$	Y 10,70 €/m ²
4 Sigmoidale (D)		
5 Parc social (E)	4 $\tau_{occ.}(b,t) = 1 - (\tau_{vac.national\ trend}(t)) \times (1 - (4 \times attractiveness(b,t)))$	X 25,20 €/m ²

Hypothèses générales

Surface de parc
Bstock surf = 35180m²
 Nombre de bâtiments
indice b = 15
 Nombre de logements
nblog = 525

La Figure 59 page suivante rappelle la composition (inventaire et cartographie énergétique) des parcs étudiés, leur consommation annuelle en kWh/m² par unité de surface moyenne sur la période *mean Econs/rented m²(t=32)* ainsi que leur taux d'attractivité prévisible. Pour rappel les coefficients de valeur verte appliqués dans MACARON sont présentés au paragraphe §2.1.2 du chapitre 6 et en annexe 1.

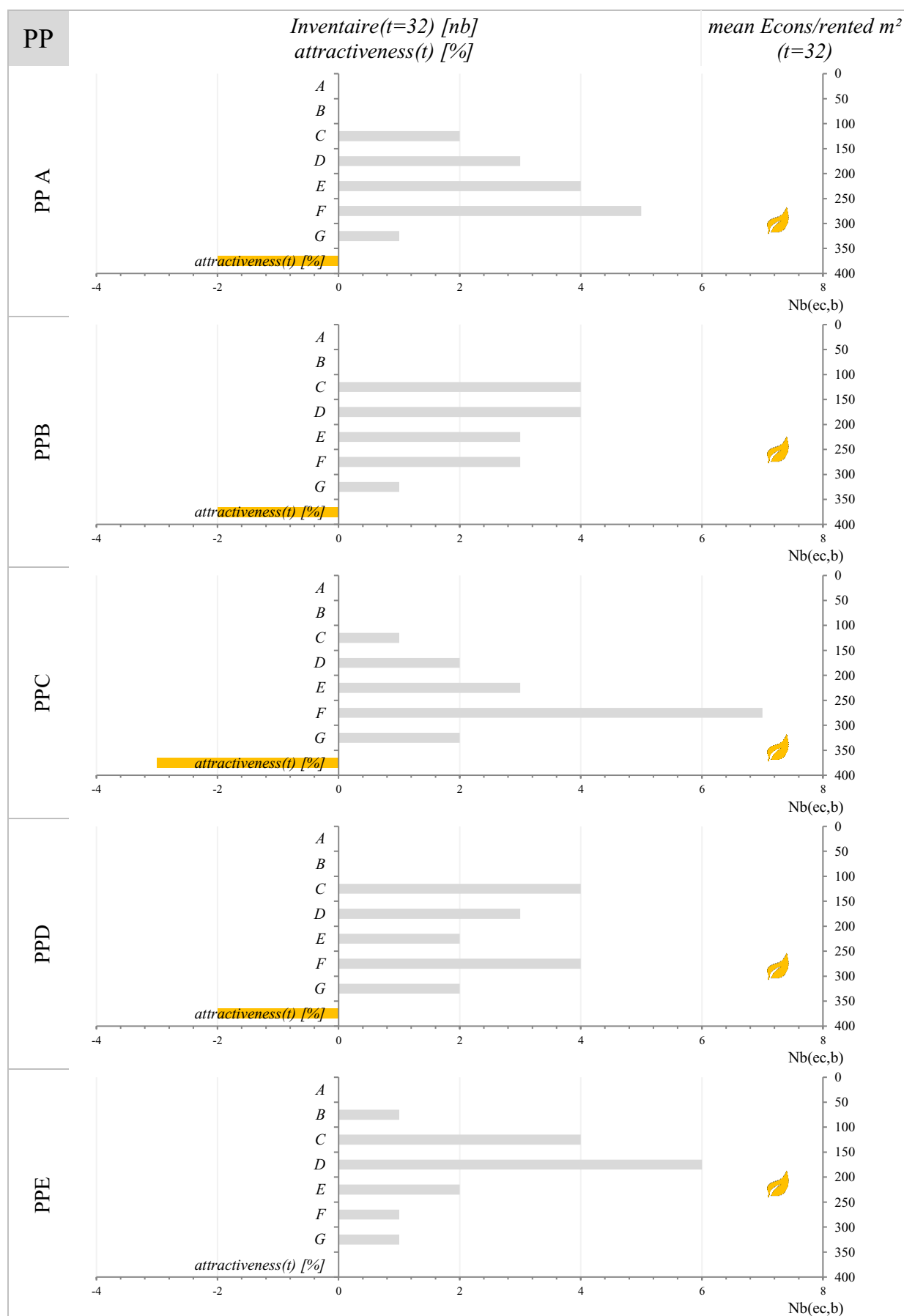


Figure 59. Synthèse des caractéristiques de PP : cartographies énergétiques, consommations énergétiques annuelles moyennes par m² occupé et coefficient d'attractivité du parc associé.

Dans le présent scénario d'analyse de sensibilité du modèle aux conditions initiales, aucune demande de rénovation ni de numérisation n'est formulée au cours de la simulation. On enregistre le comportement de référence du modèle dans les cas explicités dans la Table 51, sachant que les seuls flux financiers et humains sont à associer (voir annexe 3 pour le détail du prix des missions) :

- À la maintenance courante des bâtiments,
- Au management de l'organisation,
- Aux formations bureautiques de base et
- À l'entretien courant du système d'information.

MACARON respecte en outre un certain nombre de contraintes financières et humaines. Parmi lesquelles, les missions de maintenance sont forcées même dans le cas d'un manque de ressources financières. L'équipe de travail composée de e effectifs (M=Manager ; T=Technicien ; S=Support) est dimensionnée de façon à ce que les missions à réaliser en période « normale » (détaillé en MERH) le soient à 100% compte tenu du temps disponible. Le personnel n'est pas forcément occupé à 100% pour autant : MACARON arrondit les besoins humains calculés en période normale (voir ci-dessus) à l'ETP⁶⁶ supérieur. Le modèle considère en outre que ce temps non utilisé est perdu, il n'est pas reporté sur l'année d'exercice suivante (détaillé en MERH). Enfin la disponibilité des ressources humaines ne contraint pas le processus de décision, mais peut provoquer des surcoûts d'externalisation et de non-qualité si elle n'est pas suffisante pour assurer 100% des missions requises annuellement. Les résultats synthétiques de la sensibilité du modèle à PP, VV et VL sont présentés Figure 60.

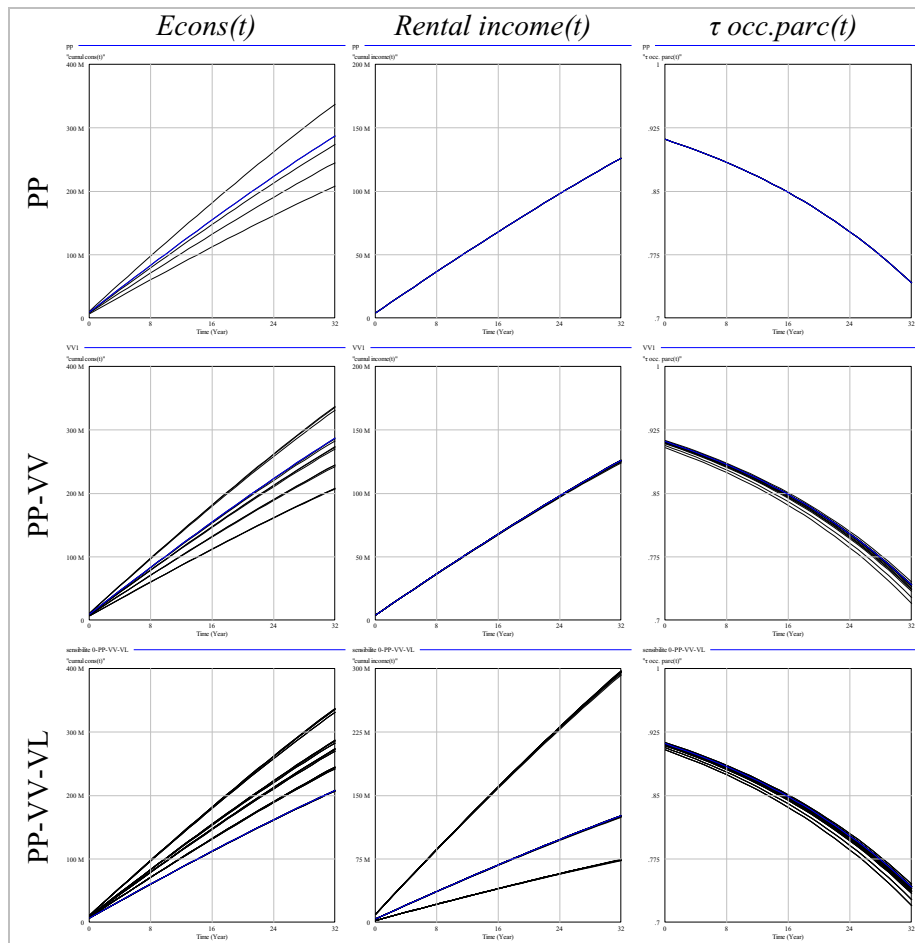


Figure 60. Tableau des impacts de PP, VV, VL sur $Econs(t)$, $Rental\ income(t)$, $\tau\ occ.parc(t)$ les consommations énergétiques (kWhep), les revenus locatifs et le taux d'occupation du parc.

Dans la Figure 60 ci-dessus, PP n'a d'impact que sur les consommations énergétiques $Econs(t)$ du parc : l'impact, prévisible et attendu de l'inventaire initial du parc sur les consommations cumulées

⁶⁶ETP : Équivalent Temps Plein, mesure du volume horaire unitaire représenté par un effectif embauché à temps plein.

(dont le comportement est exactement semblable à celui de la facture énergétique, non présentée ici), apparaît ici comme non-négligeable sur la période considérée.

VV a un impact direct sur l'occupation du parc : c'est la conséquence de la prise en compte de l'attractivité générée par la performance énergétique d'un bien. VV via son impact sur l'occupation du parc fait ainsi varier *Econs* et *Ebill* sur PP-VV. On remarque également un impact de VV sur les revenus locatifs cumulés, mais dans la Figure 60 celui-ci semble très faible.

VL enfin n'a, comme nous l'attendions, qu'un impact sur les revenus locatifs.

1.2. Analyse des résultats de SC0 : PP-VV-VL

Nos objectifs de simulation pour l'analyse des résultats de SC0 sont présentés en Table 52. Ceux-ci n'incluent pas encore d'éléments de délai, lesquels ont davantage d'intérêt à être traités pour l'évaluation de la performance des rénovations (dès le prochain scénario).

Table 52. Rappel des objectifs de simulation de SC0.

Éléments du trilemme QCD	
Q	<i>Inventaire</i>
	<i>Consommations TWh_{ep}</i>
C	<i>Occupation</i>
	<i>Capacité financière</i>

1.2.1. Consommations TWh_{ep}

Cette section a pour objet d'évaluer la performance relative des différents profils de parc, incarnés par le paramètre PP (détail en annexe 4). La Figure 61 ci-dessous présente les consommations énergétiques cumulées au pas de temps t $E_{\text{conscum}}(t)$ en TWh_{ep} pour les différents parcs (VV et VL étant définis sur leur valeur de référence).

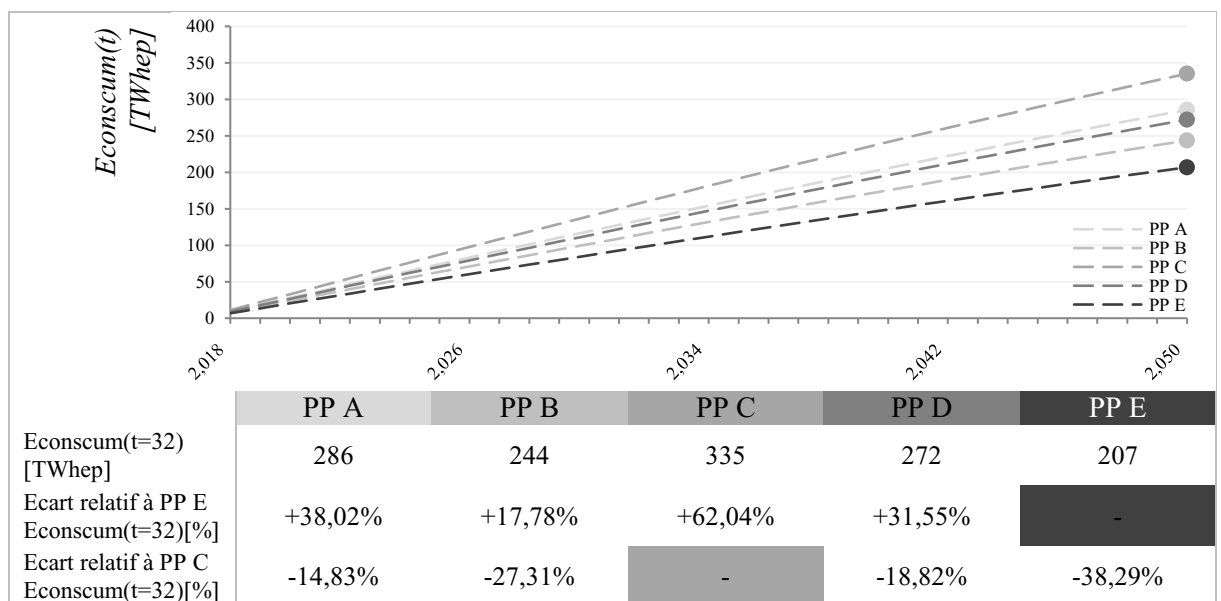


Figure 61. $E_{\text{conscum}}(t)$ selon PP, VV=0 et VL=Y.

Le parc PP C, parc le moins performant du panel étudié, a généré des surconsommations énergétiques de l'ordre de 60% par rapport au parc PP E, le parc le plus performant.

On peut d'ores et déjà s'attendre à ce que PP E soit le parc, probablement soit le moins contraint en termes de requêtes de rénovation en raison de sa composition la moins énergivore. Toutefois au vu des écarts de consommations entre les parcs, nous ne saurions nous prononcer sur la rentabilité énergétique et économique des efforts de rénovation à fournir pour chacun d'entre eux : dans une perspective où la profitabilité des rénovations se mesure en €/kWh évité, lequel des parcs PP C (gisement d'économies très important) ou PP E (nombre de rénovations limité) représente le meilleur potentiel ?

1.2.2. Occupation et capacité financière

La variation de l'attractivité qui s'applique sur les différents parcs est également à l'origine des variations de leur taux d'occupation. Or, plus le taux d'occupation du parc est élevé, plus la capacité financière de l'organisation est *a priori* améliorée par l'augmentation des revenus.

Note : Si le montant des loyers (ou des loyers et de la facture énergétique) avait été introduit(s) dans le calcul de l'attractivité, cela aurait généré une nouvelle boucle de rétroaction intéressante traduisant un raisonnement plus complexe de l'usager. Cette question pourrait être intégrée au processus de modélisation en NANO (chapitre 8).

La Table 53 ci-après présente :

- *surf.occ.cum(t=32) abs* : Écart absolu à VV0 pour VV1, VV4.
- *surf.occ.cum(t=32) rel* : Écart relatif à VV0 pour VV1, VV4.
- *Δnblog* : Delta de logements loués annuellement par rapport à VV0 pour VV1, VV4.

Table 53. Variation de l'occupation du parc : sensibilité à VV1 et VV4.

	VV1			VV4		
	<i>surf.occ.cum(t=32) abs</i>	<i>surf.occ.cum(t=32) rel</i>	<i>Δyearly rented nblog</i>	<i>surf.occ.cum(t=32) abs</i>	<i>surf.occ.cum(t=32) rel</i>	<i>Δyearly rented nblog</i>
PP A	-2 595	-0,27%	-1	-10 379	-1,06%	-5
PP B	-936	-0,10%	0	-3 746	-0,38%	-2
PP C	-3 855	-0,40%	-2	-15 421	-1,58%	-7
PP D	-1 345	-0,14%	-1	-5 379	-0,55%	-2
PP E	650	+0,07%	0	+2 598	+0,27%	+1

Pour rappel, le parc PP E est le seul à présenter un taux d'attractivité neutre, quand tous les autres parcs présentent un taux d'attractivité négatif (voir Figure 59 §1.1 du présent chapitre). La prise en compte de la valeur verte engendre pour ces parcs peu performants une diminution des produits locatifs annuels : en VV1 la perte de revenus générée représente l'équivalent des produits de location de 1 (PP A, PP D) à 2 (PP C) logements par an, et 2 (PP B, PP D) à 7 (PP C) logements par an en VV4. Dans notre cas et sur la période étudiée, ces écarts de l'occupation du parc semblent négligeables comparés au nombre de logements total du parc (525 logements au total). On note cependant une nouvelle fois un impact plus fort sur PP C, et sur PP A, parcs pour lesquels la rénovation peut devenir une *opportunité*. Mais pour qu'elles soient de force à incarner un levier d'incitation suffisamment intéressant aux yeux d'un gestionnaire, il faudrait que l'attractivité, et l'occupation qu'elle engendre, compensent le montant des rénovations par les produits locatifs maximisés.

En Figure 62 page suivante on illustre l'impact de PP-VV-VL sur la capacité financière moyenne, en €/m² loué/an, dégagée par l'organisation sur la période considérée.

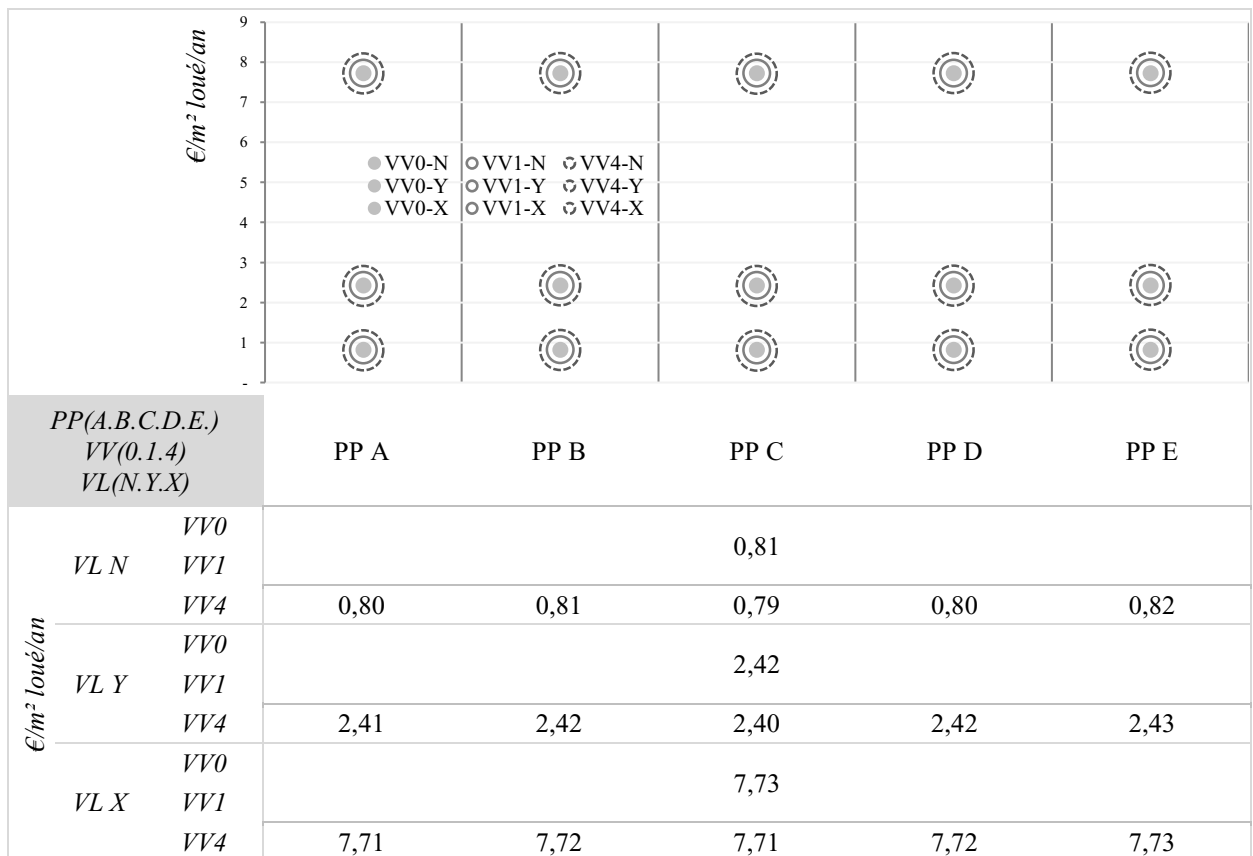


Figure 62.Capacité financière [€/m²/loué/an] : sensibilité à PP-VV-VL.

Force est de constater au vu de ces premiers résultats que la valeur verte, même quadruplée, n'a qu'un impact très limité sur l'augmentation des revenus du gestionnaire : cet impact, aussi faible soit-il, serait-il de taille à compenser les investissements ? Peut-être une telle analyse aurait-elle davantage d'intérêt à être étudiée dans une vision à court-terme, et surtout pourrait-elle être affinée par la confrontation des hypothèses du modèle (notamment le lien causal $\tau_{occ}(t) = f(attractiveness(t))$ à des séries temporelles de données de gestion locatives réelles (chapitre 8). VL la fourchette de prix locatifs, devrait en revanche avoir un fort impact et amplifier ces divergences. On interroge le modèle sur les impacts conjoints du marché locatif (VL) et de la prise en compte de la valeur verte (VV) sur la capacité financière de l'organisation pour un profil de parc PP initial donné. La Table 54 présente :

- $\epsilon(CF)/m^2 \text{ loué}(t=32)$: Capacité financière annuelle (Cash Flow) moyenne dégagée par m² loué sur la période de simulation,
- $\epsilon(CF)/m^2 \text{ loué}(t=32) \text{ rel}$: Écart relatif à VL moY pour VL miN et miN maX.

Table 54. Capacité Financière (CF) en €/m², dégagée de la location : sensibilité à VL.

VV0	VL		
	miN	moY	maX
<i>rental income(t)</i> [€/m² loué/an] (rappel)	6,30	10,70	25,20
Écart relatif à VL moY [%]	-41%	-	+136%
$\epsilon(CF)/m^2 \text{ loué}/an(t=32)$ Tout PP [€/m²/an]	0,81	2,42	7,73
Écart relatif à VL moY [%]	-67%	-	+219%

Les résultats rapportés par le modèle sont identiques (à 0,01 €/m² près) quels que soient PP et VV. On pourra donc considérer pour la suite de l'étude que ni l'un ni l'autre n'ont d'impact significatif à ce stade (c'est-à-dire en exploitation courante hors rénovation) sur la capacité financière de l'organisation. L'impact de VL est en revanche beaucoup plus remarquable.

Tandis que les valeurs locatives des logements miN et maX représentent respectivement -41% et +136% (facteur 1,5) de la valeur locative VL moY, on remarque que l'écart relatif entre les CF⁶⁷ (Cash Flows) moyens (en €/m² loué/an ; moyenne sur la période 2018-2050) a augmenté. Ainsi, d'après MACARON, si PP et VV ne présentent pas de contrainte particulièrement visible sur le rendement financier du parc, VL elle, impacte considérablement la capacité d'investissement du gestionnaire : il existe en exploitation un facteur trois entre les capacités financières engendrées par VL miN, moY et maX. On suppose alors que VL est un paramètre déterminant dans la suite de nos travaux : plus que la valeur verte, c'est lui qui contraint fortement la capacité d'investissement des rénovations.

1.3. Synthèse SC0 : choix d'une configuration du parc de logements

Le scénario SC0 exprime l'inégalité des contraintes qui s'exercent sur le pouvoir d'action des gestionnaires en fonction du niveau de qualité initial du parc et des prix pratiqués sur le marché de l'immobilier. Y sont révélées les configurations de PP et VV qui sont les plus défavorables au gestionnaire : un parc de type PP C consommera au minimum 18% de plus de kWhep qu'un parc PP B et jusqu'à 60% de kWhep de plus qu'un parc PP E. De ce constat on peut d'ores et déjà déduire que l'effort de rénovation à fournir en PP C sera le plus intense pour en résorber l'obsolescence énergétique.

À cela s'ajoute la contrainte de moyens financiers qui transite par la valeur locative des logements : celle-ci représente dans MACARON un facteur de poids dans variation des ressources rendues disponibles pour les investissements en rénovation. On suppose qu'elle peut même devenir critique dans une configuration associant $PP=C$ et $VL=miN$, cas le plus défavorable du panel de configurations analysé.

La valeur verte VV n'a en revanche qu'un impact très limité sur les dynamiques d'occupation et de revenus, à ce point que ses effets sur la capacité financière globale de l'organisation apparaissent ici comme négligeables. Même quadruplée, VV ne diminue l'occupation cumulée du parc que de 1% pour les parcs les moins performants. Telle que nous l'avons représentée dans le modèle, la valeur verte ne semble pas être un levier suffisant pour inciter à l'amélioration des capacités de financement du gestionnaire. VV n'est donc pas déterminant dans nos travaux. Si ce n'est pas par la valeur verte, par où doit/peut transiter le « retour sur investissement », la « récompense » des opérations de rénovation engagées ? (chapitre 8)

En ce qui concerne le profil de parc, notre choix portera sur un parc de type PP E, représentatif d'un parc réaliste. Nous pourrions par ailleurs faire appel à SC0 dans les sections suivantes pour analyser, lorsque cela est pertinent, la configuration PP=C et VL=miN laquelle nous semble également avoir un intérêt dans notre analyse. On choisira en revanche la valeur médiane de la fourchette des valeurs locatives, de sorte que notre objet d'étude soit représentatif d'un cas intermédiaire. On conservera VV=1 pour voir l'impact de l'amélioration énergétique du parc sur son attractivité dans les conditions réelles décrites par (DINAMIC, 2015). Le scénario de référence sur lequel nous ferons porter nos analyses dans les sections suivantes est donc la configuration PP-VV-VL = E1Y tel que représenté en Figure 63.

SC - PP VVI VL																																
CODE : 0 - E 1 Y																																
SC 0	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE					RESS.HUMANES		ECONOMIE																
	E	VL			MIX				LOD					MAT		VV																
		X	Y	N		I	E	R		0	1	2	3	4	5		1	2		M	N	P										
	VV								FORM 1 0						TO 5 2 0			DER 2 1														
	4	1	0																													
paramètres activés paramètres désactivés																																

Figure 63. Tableau de synthèse SC0 : choix d'une configuration du scénario de référence.

⁶⁷ VL : $\text{revenus}(t)$; CF(t) : $\text{revenus}(t) - \text{dépenses}(t)$

2. Scénario SC1 : 1-E1Y-RT-MIX

2.1. Paramètres RT-MIX et causalités simplifiées

Le scénario SC1 explore à présent l'impact du type de missions énergétiques pratiquées sur le parc, sur le niveau de contrainte financière qui s'exerce sur l'organisation : le gestionnaire parvient-il à financer l'intégralité des opérations de rénovation ? Les rénovations lui permettent-elles d'améliorer la capacité financière moyenne sur la période considérée ? Quelles conclusions tirer du bilan énergétique des stratégies de rénovation modélisées ? Dans cette section on observe la sensibilité du modèle à la variation :

- des dynamiques d'évolution, en lien ou non avec la réglementation thermique en vigueur, des objectifs du décideur en matière de rénovation et d'efficacité énergétique des objets techniques (RT) ;
- des objectifs de décarbonation du parc et de rénovation des mix énergétiques (MIX).

La Figure 64 et l'arbre des causalités en Figure 65 page suivante résument les configurations qui seront testées par le présent scénario SC1 et les causalités mises en jeu dans MACARON.

SC - PP VV1 VL

CODE : 1 - E 1 Y - RT MIX

SC 1	REFERENCE			ENERGIE			NUMERIQUE						RESS.HUMAINES		ECONOMIE		
	E	VL		MIX			LOD						MAT		VV		
		X	Y														
	VV	4	1										0				

•

paramètres actifs : test des configurations du SC en cours

•

paramètres actifs : selon configurations retenues

■

paramètres désactivés

PP

E : Parc social

Figure 64. SC1 : Analyses de sensibilité RT-MIX.

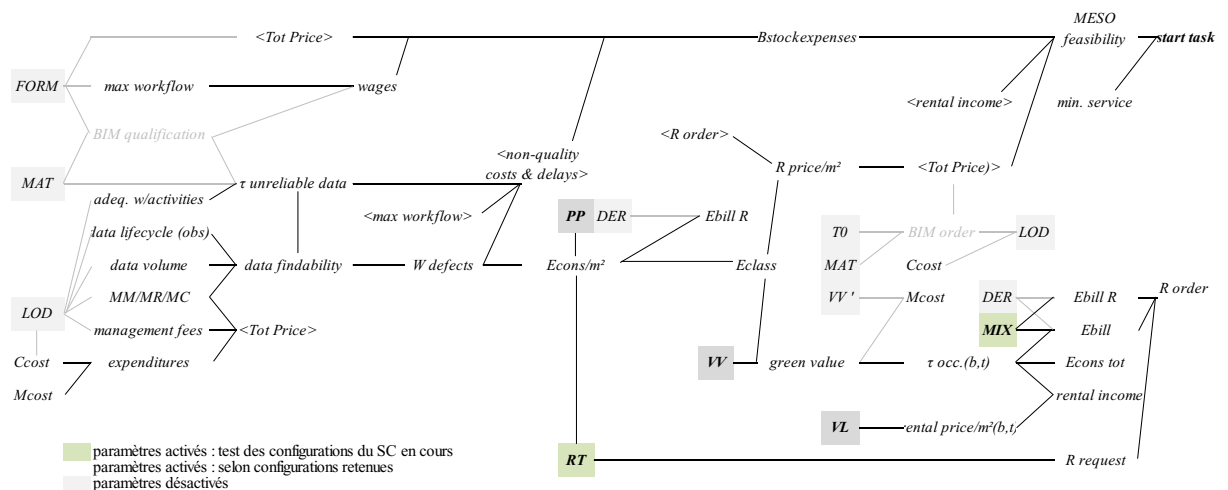


Figure 65. Arbre des causalités simplifié SC1.

La Table 55 page suivante rappelle les caractéristiques des configurations retenues pour la modélisation dynamique de RT et MIX dans MACARON. On peut d’ores et déjà admettre que l’impact de ces paramètres concernera principalement le rythme, la performance et les coûts induits par les stratégies énergétiques envisagées.

Table 55. Caractéristiques des paramètres RT et MIX.

Évolution des exigences d'efficacité énergétique (RT)		Rénovation des mix énergétiques du parc (MIX)	
1	<i>Classe A</i> Le seuil de consommations énergétiques admissibles à travers le parc et l'objectif de performance des rénovations sont fixes et indépendants de la réglementation thermique en vigueur. Les requêtes de rénovations sont déclenchées pour tout bâtiment dont la consommation excède l'équivalent d'une Classe C, et visent une efficacité supérieure au seuil de la Classe A.	I	<i>Inchangé</i> Pas de rénovation du mix énergétique des bâtiments, qui reste à l'état initial : $MIX I(en)^{68} = (21\% ; 79\% ; 0\%)$
	-50%/10ans Le seuil de consommations énergétiques admissibles à travers le parc et l'objectif de performance des rénovations sont liés à la réglementation thermique en vigueur. Celle-ci connaîtra, au cours des années à venir, un renforcement du niveau de performance réglementaire tant pour les requêtes que pour les objectifs de rénovation des bâtiments.		<i>Electrique 100%</i> Rénovation du mix énergétique des bâtiments vers 100% énergie fossile électricité : $MIX E(en) = (100\% ; 0\% ; 0\%)$
	<i>As New – Neuf</i> Le seuil de consommations énergétiques admissibles à travers le parc et l'objectif de performance des rénovations sont liés à la réglementation thermique en vigueur. Celle-ci connaîtra, au cours des années à venir, un renforcement du niveau de performance réglementaire tant pour les requêtes que pour les objectifs de rénovation des bâtiments.		<i>Renouvelable 100%</i> Rénovation du mix énergétique des bâtiments vers 100% énergie verte : $MIX R(en) = (0\% ; 0\% ; 100\%)$

RT et MIX ont un impact prononcé sur les consommations énergétiques en kWh_{ep} cumulées *Econs* (et proportionnellement sur *Ebill*, facture énergétique cumulée non représentée ici). On observe dans l'analyse des impacts de RT seuls le détachement progressif de trois courbes au cours du temps : les trois chemins de transitions dessinés en chapitre 6. Puis à l'introduction de MIX dans l'analyse de sensibilité, on remarque en Figure 66 page suivante que plus le chemin de transition est ambitieux, plus il est sensible à la décarbonation du parc : nette divergence des chemins de MIX en RT 1 (courbe bleue), moins visible en RT 5 et RT 9.

Le coût unitaire (moyen sur la période considérée) des rénovations par m² de surface de bâtiment est beaucoup plus élevé en RT 1 qu'en RT 5 et RT 9 (dont on ne dissocie pas nettement les courbes en Figure 66 ci-dessous). À l'inverse des consommations énergétiques, le coût des rénovations est d'autant moins sensible à MIX que le chemin de transition est ambitieux, c'est-à-dire que le delta financier entre des rénovations incluant et n'incluant pas le MIX est d'autant plus grand que la performance exigée des rénovations est faible. On observe le même type de comportement à l'analyse de l'évolution de l'occupation du parc.

Parce qu'on a identifié dans la partie précédente que la contrainte sur le pouvoir d'action du décideur est différent pour chaque parc, on reproduit la même analyse pour PP C de sorte à identifier un potentiel contraste entre les chemins de transition de PP E et PP C, respectivement les parcs le plus et le moins performants traités en SC0. On observe à cette occasion des divergences plus prononcées de *Econs(t)*, *attractiveness(t)* et *mean Rcost/m²* sur RT-MIX en PP C qu'en PP E. On confirme ainsi l'impact conjoint non négligeable du profil de parc et de la stratégie de rénovation qui lui est appliquée (nos hypothèses, émises dans la partie précédente) dans les dynamiques d'amélioration des performances énergétiques et financières d'un espace bâti.

⁶⁸ en=(elec,gas,renewable) indice énergie.

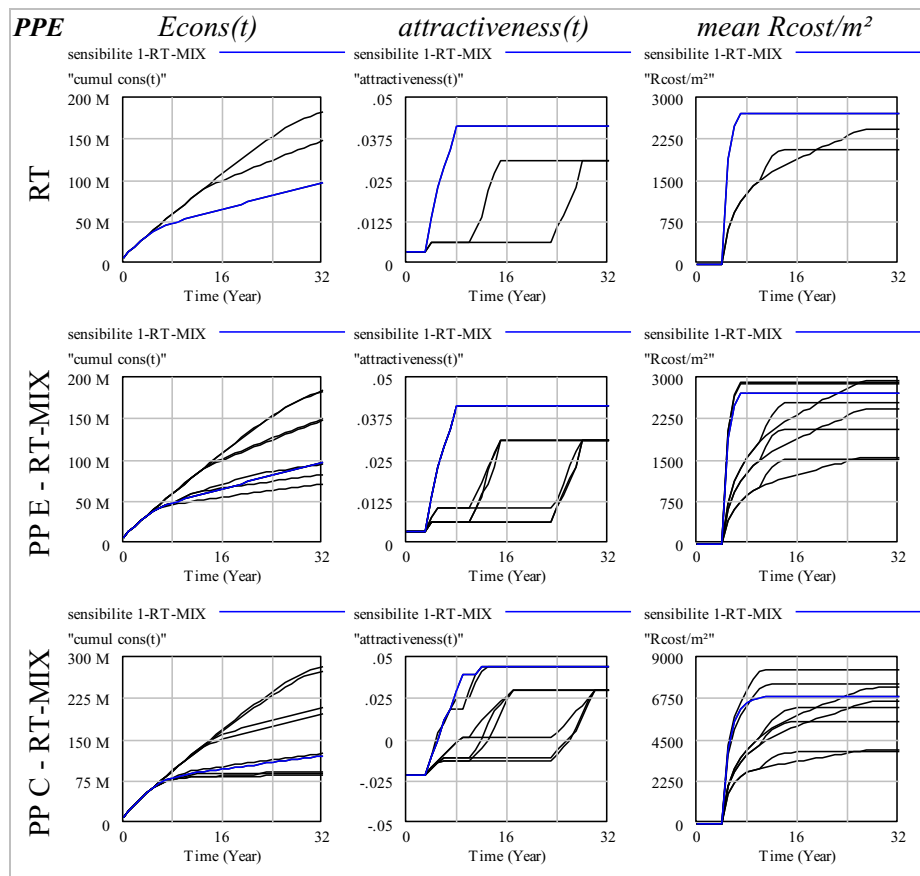


Figure 66. Tableau des impacts de RT et MIX sur $Econs(t)$, $attractiveness(t)$, $mean Rcost/m^2(t)$ les consommations énergétiques (kWhep), l'attractivité du parc et le coût moyen des rénovations par unité de surface.

2.2. Analyse des résultats de SC1 : E1Y-RT-MIX

Nos objectifs de simulation pour l'analyse des résultats de SC1 sont présentés en Table 56.

Table 56. Rappel des objectifs de simulation de SC1.

Éléments du trilemme	
Q	<i>Inventaire</i>
	<i>Gains TWh_{ep}</i>
	<i>Gains TWh_{cumac}</i>
C	<i>Occupation</i>
	<i>Capacité financière</i>
	<i>Consommation des ressources financières</i>
D	<i>Consommation des ressources humaines</i>
	<i>Rénovations reportées</i>

2.2.1. Gains de performance énergétique

Dans ces travaux on envisage l'évaluation de l'efficacité des stratégies de rénovation sous deux aspects complémentaires : les consommations énergétiques évitées en TWhep bruts et les consommations énergétiques évitées TWhef cumulés actualisés, engendrés à horizon de simulation par les différentes configurations de RT-MIX.

Le kWhep⁶⁹ est l'unité de mesure utilisée dans l'élaboration des DPE et dans la réglementation thermique. Il intègre les consommations nécessaires à la production et au transport de l'énergie, quand le kWhef⁷⁰, ne mesure que le montant d'énergie réellement consommée par l'utilisateur final et s'affranchit de la prise en compte des consommations amont. Le kWhcumac (unité de mesure des consommations en énergie finale cumulées et actualisées d'un produit sur sa durée de vie) est toutefois utilisée pour l'établissement des Certificats d'Économies d'Énergie. Le kWhep et le kWhef nous sont ainsi tous deux utiles dans l'observation du comportement de MACARON : le kWhep nous permet d'introduire une prise en compte accrue de la dimension environnementale et le kWhef nous permet de confronter l'approche environnementale avec une vision usager. Ces deux types de mesure ont-ils des choses à nous apprendre sur l'évaluation de l'efficacité des projets ? Y a-t-il complémentarité, redondance ou divergence des résultats ?

Concernant les consommations en énergie primaire tout d'abord, la Figure 67 page suivante présente les résultats obtenus par MACARON pour la variable *Inventaire(t=32)* dans les différentes configurations de RT. On y observe les cartographies énergétiques du parc PP E obtenues à horizon de simulation (2050 : t=32) en fonction des différentes stratégies de rénovation qui lui sont appliquées.

Pour rappel, MACARON présente des spécificités dans l'évaluation de la performance énergétique, à savoir :

- $Econs/(m^2.an)(t)$; *Inventaire(t=32)*

Leur calcul prend en compte les consommations en énergie primaire de tous types d'énergies, énergies vertes renouvelables incluses. Ce sont des indicateurs de sobriété énergétique : plus que minimiser les dépenses énergétiques, on veut minimiser les besoins.

- $Econscum(t)$; $\%Econscum(t)$; $mean\ Econs/(m^2.an)(t)$

Les consommations énergétiques d'origine verte ou renouvelable ne sont pas comptabilisées dans la consommation globale en énergie primaire du parc : dans MACARON ces consommations en TWhep sont donc nulles en termes d'impact sur l'environnement (on s'affranchit pour cela des consommations énergétiques des auxiliaires considérées ici comme négligeables).

C'est ce qui explique que MIX n'agit pas ici sur la qualité de l'inventaire, laquelle traite de la sobriété énergétique.

En Figure 67 ci-dessous, toutes les configurations ont généré un accroissement de *mean annual attractiveness(t=32)*, le coefficient d'attractivité moyen du parc à t=32 (à comparer à la Figure 59 §1.1 du présent chapitre : *mean annual attractiveness(t=32)* de PP E = 0%). On remarque que si le modèle calibré en RT 5 et RT 9 génère le même profil de parc à horizon de simulation, le coefficient d'attractivité moyen sur la période, lui, diffère dans les deux cas de figure : les raisons de cet écart sont à trouver dans le séquençage des opérations de rénovation induit par RT et détaillées ci-après. RT 1 est la configuration qui génère de loin la cartographie la plus intéressante d'un point de vue énergétique et le meilleur taux d'attractivité moyen sur la période.

⁶⁹ Kilowatt/heure d'énergie primaire.

⁷⁰ Kilowatt/heure d'énergie finale.

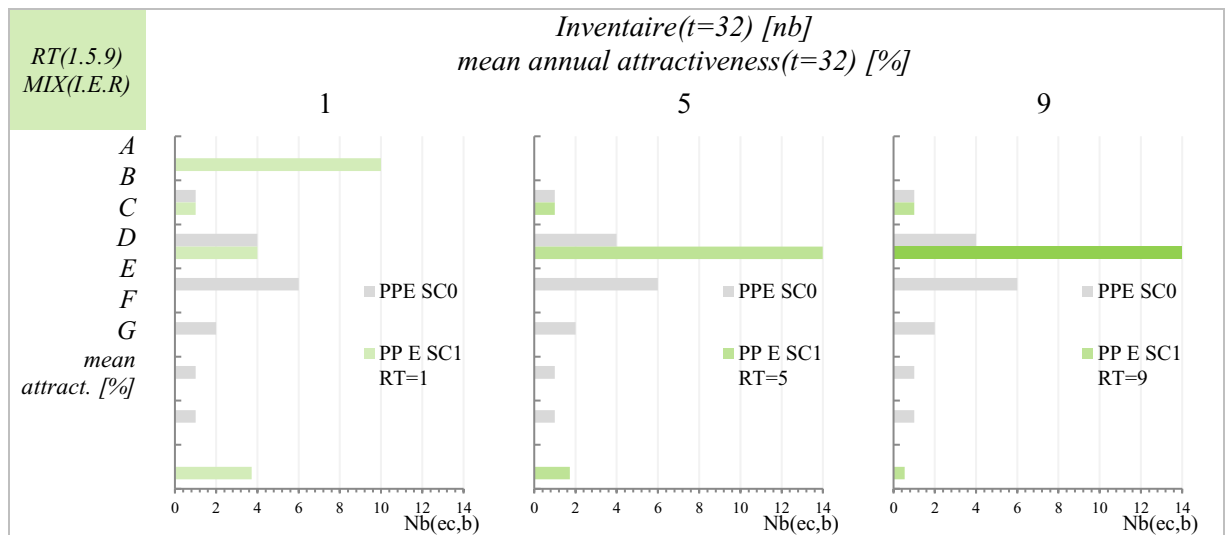


Figure 67. Inventaire final à (t=32) et attractivité annuelle moyenne du parc sur la période de simulation : sensibilité à RT.

Les consommations énergétiques en kWh_{ep} cumulées sur la période $E_{conscum}(t=32)$ sont confrontées à celles obtenues en SC0. Les écarts relatifs $\%E_{conscum}(t=32)_{SC1} / SC0$ entre les résultats de SC0 et ceux obtenus dans les différentes configurations de RT-MIX sont présentées en Figure 68 ci-dessous. Les deltas de performance énergétique relatifs à SC0 montrent que RT 1 est bien plus efficace que RT 5 et RT 9 même sans rénovation du mix : en MIX I, le premier chemin de transition résorbe près de 60% des consommations générées en SC0, quand RT 5 et RT 9 engendrent respectivement une amélioration de seulement 30% et 20% seulement, c'est 2 à 3 fois moins ! Si les configurations de MIX engendrent des résultats sensiblement équivalents en RT-I et RT-E, le chemin de transition incluant la rénovation du mix, RT-R, se détache nettement : il améliore 2 à 3 fois l'efficacité des rénovations 5-(I,E) et 9-(I,E) respectivement, si bien que ces configurations atteignent des performances du même ordre de grandeur que les stratégies de type 1-(I,E) ! On observe par ailleurs un effet moindre mais non négligeable de 1-R qui engendre tout de même une surperformance de 10% par rapport aux configurations 1-(I,E). La résorption des consommations d'énergies fossiles par l'intégration des ENR serait alors de force à compenser le gisement de gains non-exploité par des rénovations de moindre intensité RT 5 et RT 9. Finalement, moins la stratégie de rénovation hors mix énergétique est ambitieuse, plus le fuel switch a d'intérêt : ainsi, si la décarbonation du parc n'est pas dans MACARON vecteur de sobriété, elle représente toutefois un enjeu majeur de la qualité environnementale du parc.

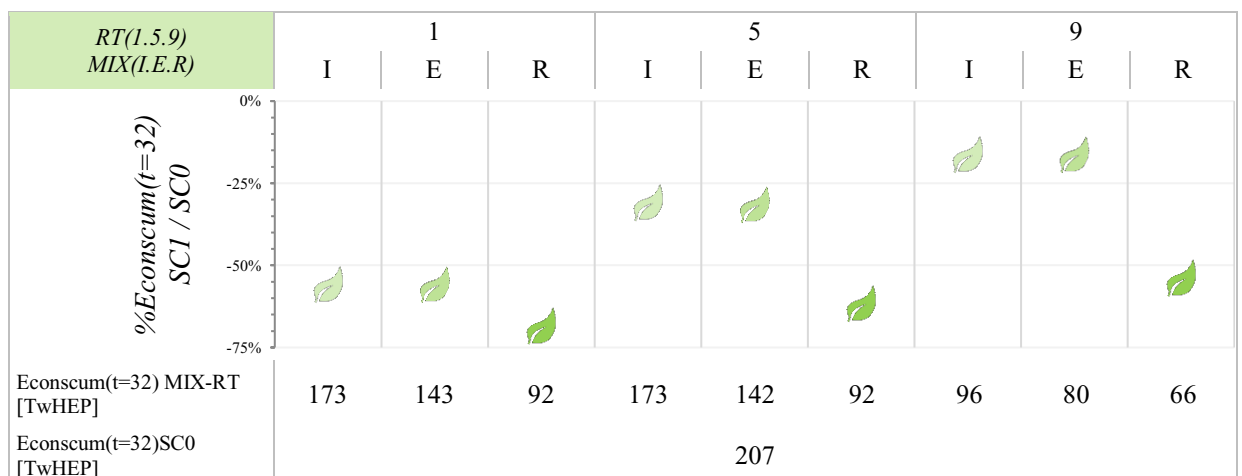


Figure 68. Ecart relatif à SC0 des consommations cumulées de PP E en TWhep : sensibilité à RT-MIX.

L'amélioration énergétique très progressive du parc, générée par un étalement important des rénovations dans le temps en RT 5 et RT 9, est à l'origine des écarts obtenus en RT, comme le montre le tracé des consommations d'énergie primaire moyennes annuelles en Figure 68. Dans les trois cas de RT, les MIX I et E génèrent les mêmes chemins de transition, seul MIX R possède son propre

chemin : on s'aperçoit que si MIX R n'a pas d'impact sur l'étalement temporel des rénovations en RT 1, RT 5 et RT 9 y sont en revanche sensibles puisque MIX R avance d'un an la fin des travaux en RT 5 et de cinq ans en RT 9. Cela s'ajoute en outre, toute considération du MIX mise à part, au fait que les périodes de travaux engagées par RT 5 et RT 9 sont deux à cinq fois plus importantes qu'en RT1 :

- période RT 1 : 2021-2026 ; cinq années
- période RT 5 : 2021-2032 en MIX R ou 2033 en MIX(I,E) ; 11 à 12 années
- période RT 9 : 2021-2041 en MIX R ou 2046 en MIX(I,E) ; 20 à 25 années

Sont en cause, dans les configurations RT 5 et RT 9, les requêtes multiples, parfois successives, sur un même bâtiment avec pour objectif un voire pas de saut de classe à chaque rénovation.

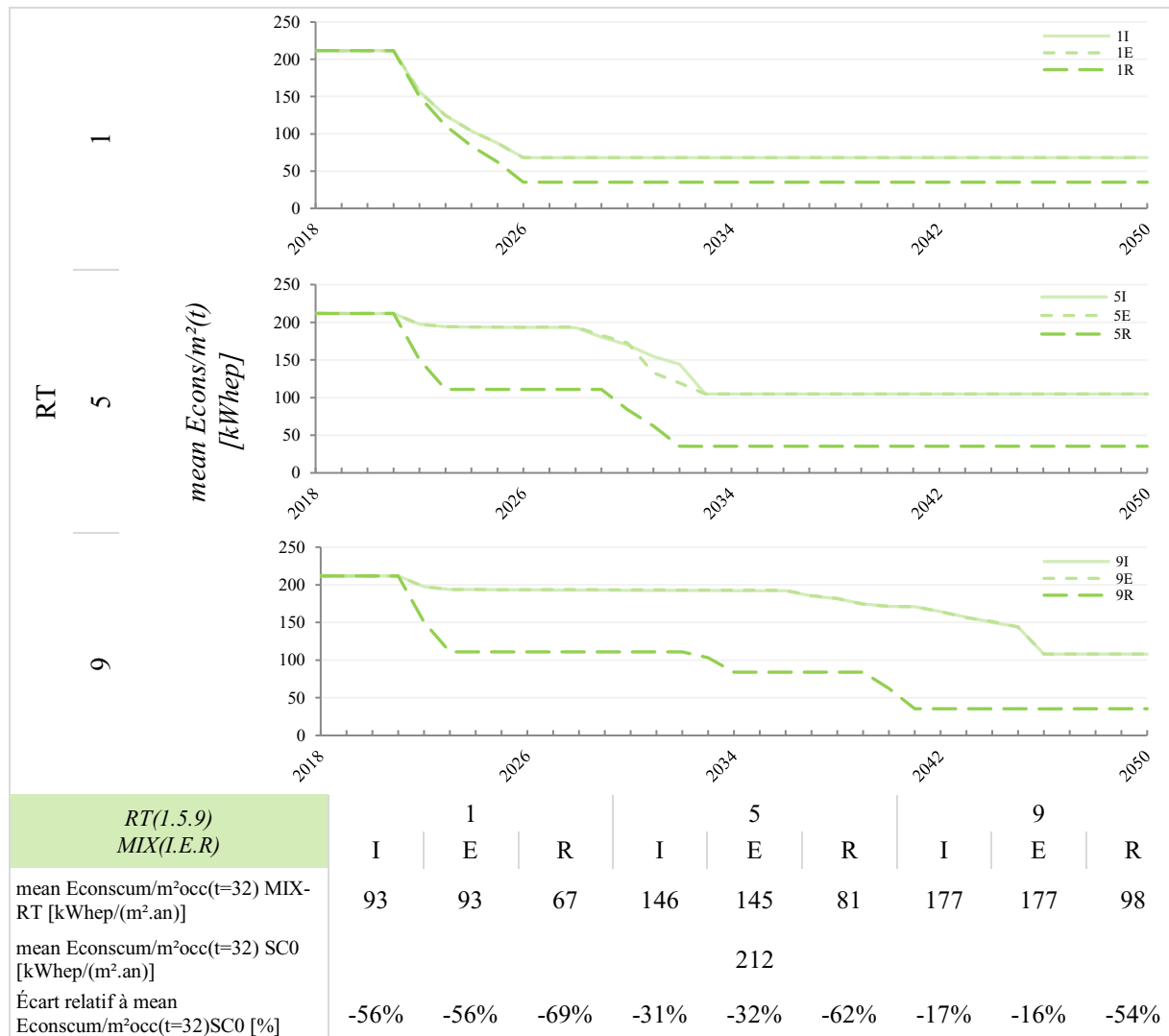


Figure 69. Consommations TWhep/m² moyennes annuelles et cumulées : sensibilité à RT-MIX

Le scénario proactif RT 1, lequel ne provoque qu'une rénovation par bâtiment maximum (en raison de requêtes à large spectre et d'un objectif fixe) génère quant à lui une amélioration d'un ou plusieurs sauts de classe, vers la classe A, à chaque rénovation. À la question « *vaut-il mieux opérer une fois une rénovation de grande ampleur, ou séquencer les travaux ?* » MACARON semble répondre que l'attentisme n'est pas une option dans une vision à long-terme.

Une autre question qui nous occupe dans ce scénario est l'évaluation des consommations évitées en énergie finale. Si en énergie primaire l'identification de la configuration RT-MIX la plus performante ne fait aucun doute (à savoir RT-MIX=1R), en va-t-il de même de l'évaluation des gains en énergie finale ? Ces gains suivent-ils les mêmes chemins de performance ? Les kWhcumacs peuvent-ils se révéler une aide à la décision en complément de kWhep, dans le cas où les $\Delta Econs$ sont très proches ?

MACARON utilise le kWhcumac pour mesurer le gain énergétique en énergie finale dû aux investissements en rénovation, actualisé et cumulé dans le temps. Les investissements anticipés, actualisés sur une plus longue période, bénéficient ainsi d'une plus-value énergétique et environnementale qui n'est pas sans intérêt dans la recherche d'une forme de « rentabilité » des opérations de rénovation. Ainsi dans MACARON chaque gain de TWhef est associé par le modèle à une dépense en rénovation, et actualisé à compter de la date dudit investissement selon le principe de calcul du TWhef⁷¹. La Figure 70 représente le cumul à l'instant t de ces gains actualisés pour les configurations de RT-MIX.

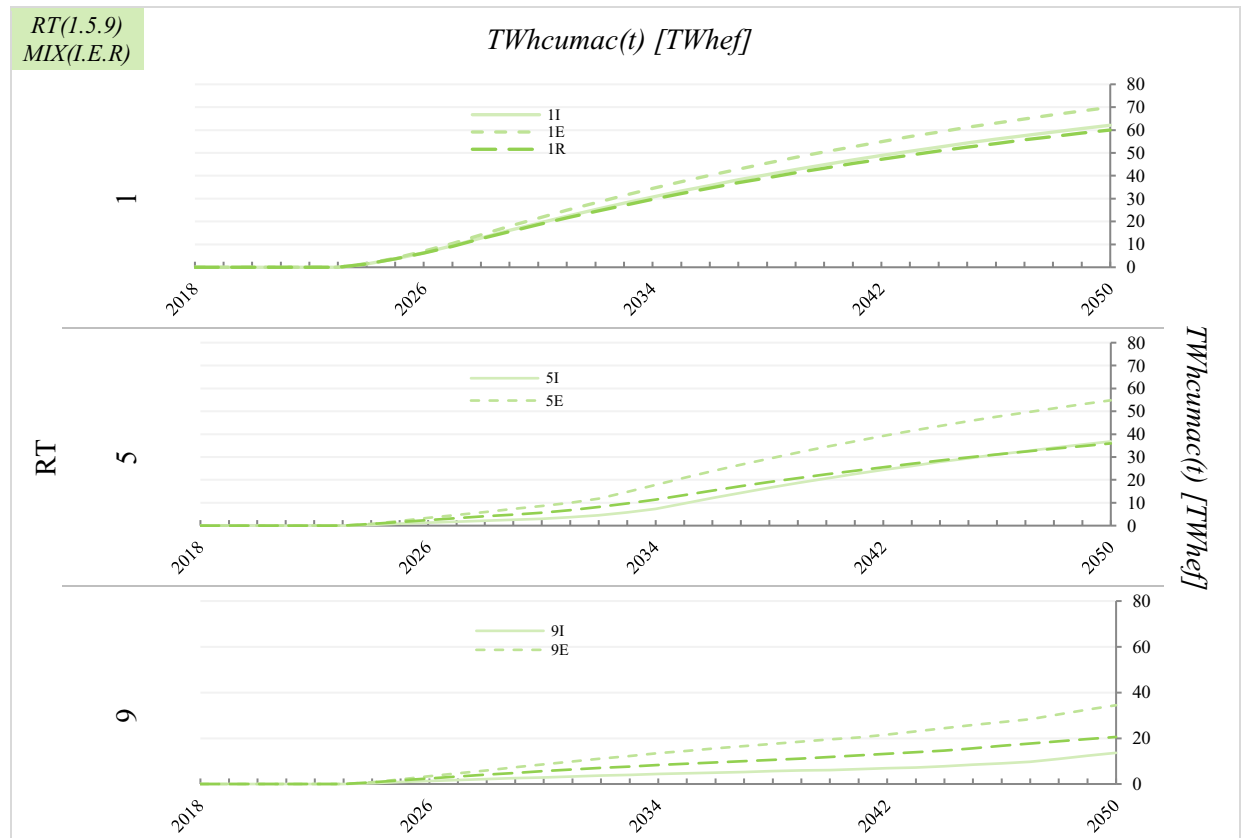


Figure 70. Gains TWhef cumulé (TWhef) : sensibilité à RT-MIX.

On remarque que MIX E présente des perspectives plus intéressantes que MIX I et MIX R quelle que soit la configuration de RT étudiée. Cette divergence notable s'explique par le coefficient de conversion d'énergie primaire en énergie finale (2,58 pour l'électricité, 1 pour les autres énergies). Dans la Figure 71, on présente les écarts relatifs de $TWhef(t=32)$ entre les résultats de RT I et RT E et ceux de RT-R.

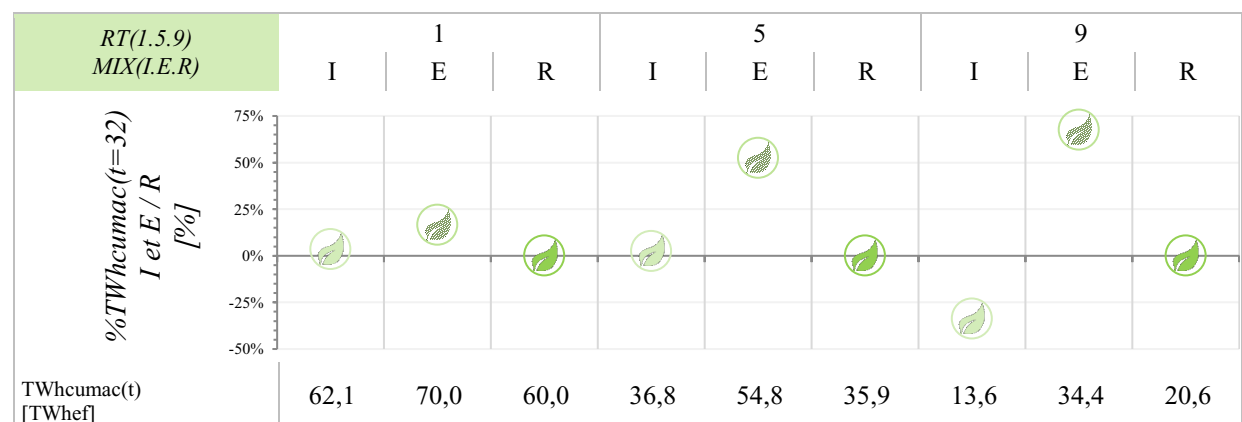


Figure 71. Gains TWhef cumulé (t=32) RT-I et RT-E : écart relatif à RT-R.

⁷¹ https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_1465/note_de_synthese_CEE_actualisee_2018_V2Finale_MEP.pdf

Comparées deux à deux, les configurations RT-E et RT-R présentent un écart relatif compris entre 20% et 70% de gains en TWhcumac en faveur de RT-E, une nouvelle fois l'écart mesuré est d'autant plus grand que RT représente un chemin de transition peu ambitieux. De tels écarts ne se reproduisent pas entre RT-R et RT-I. Dans cette perspective, la décarbonation du parc et l'introduction des ENR sont rendus beaucoup moins attractifs que dans l'évaluation en énergie primaire : le coefficient de conversion de l'électricité pourrait même ici entraver la rénovation du mix vers 100% d'électricité verte si la stratégie de rénovation s'appuyait sur le meilleur scénario TWhcumac.

2.2.2. Évolution de la capacité financière

La Figure 67 p.191 présentait les cartographies *Inventaire(t=32)* et coefficients d'attractivité moyens *mean annual attractiveness(t=32)* du parc selon RT-MIX. Dans cette section on souhaite mettre en évidence l'impact des rénovations sur la capacité financière de référence de l'organisation mesurée en SC0.

L'évolution de la capacité financière de l'organisation résulte de la confrontation des dynamiques de coûts et de fréquence des rénovations, et de la variation d'occupation du parc amélioré. La Figure 72 ci-après juxtapose :

- le coefficient d'attractivité moyen du parc sur la période de simulation, résultant de l'amélioration de sa performance énergétique,
- l'écart relatif, par rapport à SC0, du cumul des surfaces occupées sur la période de simulation, engendré par la variation de l'attractivité annuelle du parc,
- le montant, en €/m²loué/an de capacité financière, dégagé par l'activité de gestion de patrimoine incluant la stratégie de rénovation.

Si en SC0, sans rénovations, la seule prise en compte de VV et de son impact sur l'occupation n'avait qu'une incidence faible sur la capacité financière de l'organisation, en SC1 l'amélioration énergétique du parc engendre des variations notables de la balance financière sur toutes les configurations de RT-MIX. La plus intéressante d'entre elles sous cette perspective est 9-R : en dépit d'un coefficient d'attractivité relativement faible comparé à celui dégagé par les autres RT-MIX, un montant global de travaux beaucoup moins important allié à une augmentation même faible des revenus est visiblement à-même de générer une meilleure rentabilité financière que les investissements proactifs. Hormis 9-R, RT 1 et RT 9 présentent des performances financières équivalentes : encore un argument lequel, s'il est favorisé dans la prise de décision, peut détourner le gestionnaire d'un chemin de transition proactif.

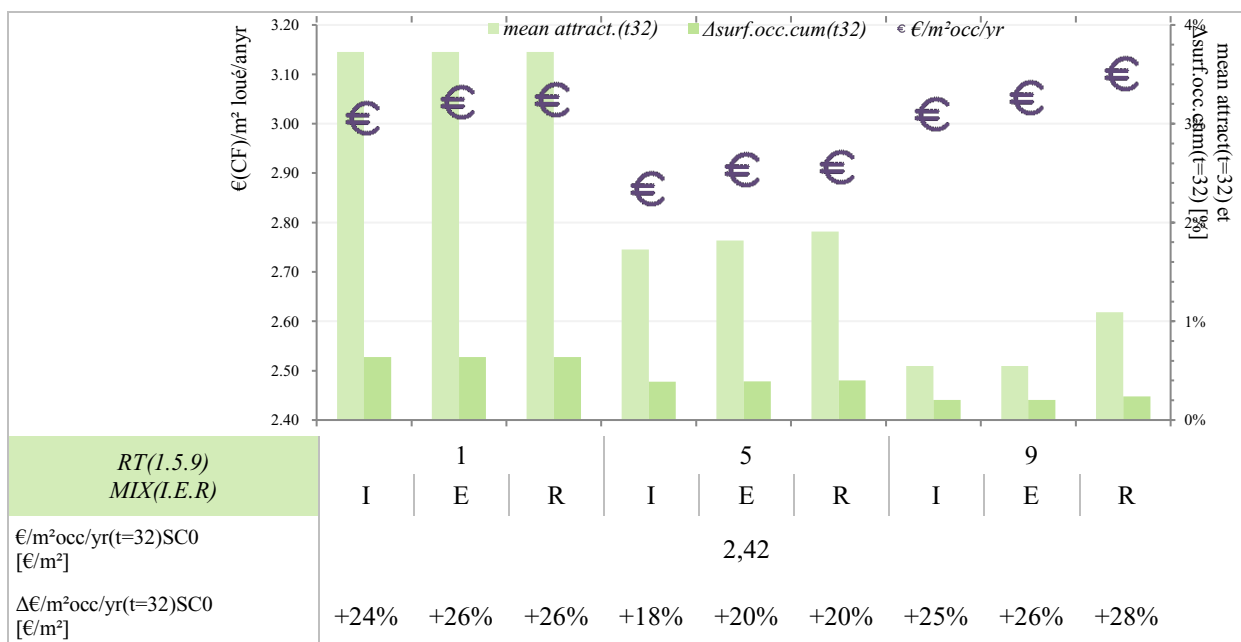


Figure 72. Ecart relatif à SC0 de la capacité financière [€/m²/an] : sensibilité à RT-MIX.

La configuration RT 5 est ici la plus défavorable puisque $\Delta\text{revenus}-\Delta\text{dépenses}$ engendre l'augmentation la moins importante de la capacité financière : il atteint tout de même un gain de quelques 20% sur les bénéfices générés par m² loué par rapport au cas de référence. Dans notre étude, la rénovation ne contraint donc pas les investissements BIM : au contraire ils permettent même de dégager une augmentation de la capacité d'investissement (si toutefois la valeur verte est activée ce qui est bien le cas ici).

Pour rappel, MACARON est conçu de manière à ce que les rénovations qu'il ne peut assumer financièrement soient reportées sous la forme d'une nouvelle requête l'année suivante. L'indicateur *delayed requests* est donc le témoin d'une capacité financière insuffisante pour satisfaire un certain nombre de demandes. On s'intéresse à l'impact de RT-MIX sur la capacité financière du décideur, la question sous-jacente étant : vaut-il mieux viser des rénovations de THPE quitte à ce que certaines soient repoussées ponctuellement par manque de moyens, ou ne reporter aucune rénovation mais favoriser des rénovations de moindre performance ? Aucun report des opérations pour le parc PP E n'est mesuré quelle que soit la configuration RT-MIX analysée. Nous mettions précédemment en évidence la contrainte particulièrement importante qui s'applique potentiellement sur un parc de type PP C. On interroge ici l'impact conjoint de PP(E,C)-RT-MIX sur le nombre de reports de rénovations : même dans la situation la plus défavorable CN4-1R⁷², le parc PP C ne connaît qu'un seul report de rénovation pour quatorze ordres de rénovations honorés, sur un total de quinze requêtes. Tel que configuré, MACARON ne subit donc pas de pression excessive sur la faisabilité financière des travaux requis au cours de la simulation.

Un autre élément de contrainte du modèle intéressant à approfondir serait *Rsupply* : le nombre de rénovations annuelles. Quel *Rsupply max* l'organisation peut-elle financièrement supporter (chapitre 8) ou quelle pression financière (report des opérations) engendre-t-il ? Ces questions font par ailleurs appel à une autre approche de la capacité financière, qu'est la notion de risque financier : la contrainte d'une trésorerie minimale permanente pourrait faire partie des paramètres de décision, « *quel MESO CashFlow min acceptable pour autoriser les travaux ? Si pas de marge suffisante, abandon* ». Ici nous nous contenterons de considérer que pour le rythme de rénovation choisi, les travaux se déroulent sans report en PP E. On regardera en SC2 si ce niveau de contrainte a évolué avec les investissements BIM, toujours sur CN4-1R. On s'appuiera sur les éléments présentés en Table 57 pour comparaison le cas échéant.

Table 57. Valeurs de référence pour Delayed requests(t=32)
en configuration CN4-1R.

REF CN4-1R	Nb(t=32)	Delayed requests(t=32)
Postponed renovations cum(t=32)	1	
Rrequestscum(t=32)	15	7%
Start Rcum(t=32)	14	

2.2.3. Consommation de ressources internes : volumes financiers/horaires

Les coûts financiers et humains des rénovations sont un élément central de notre modèle c'est à travers eux que va transpirer la notion de performance à la fois du projet, mais aussi de l'organisation. Cela fait écho à la question posée au paragraphe §2.2.1 « *vaut-il mieux opérer une fois une rénovation de grande ampleur, ou séquencer les travaux ?* », cette fois dans une perspective socio-économique. Nous l'avons explicité ci-avant, selon la configuration de RT-MIX déployée sur le parc les requêtes de rénovation peuvent être plus ou moins nombreuses, parfois successives, et d'intensité très variable (un ou deux sauts de classe en RT 5 et RT 9, au moins un en RT 1) sur un même bâtiment au cours de la simulation. Or les rénovations de faible intensité sont moins chères en terme de prix unitaire en €/kWh_{ep} résorbé par les travaux, et peuvent en cela présenter (à première vue) d'éventuels avantages économique-financiers à faire de la performance énergétique progressive (un de ces avantages est l'amélioration de la capacité financière de l'organisation tel que montré dans la section précédente).

⁷² (CN4-1R) = PP=C ; VV=4 (défavorable pour un parc de performance médiocre) ; VL=N ; RT 1 ; MIX=R.

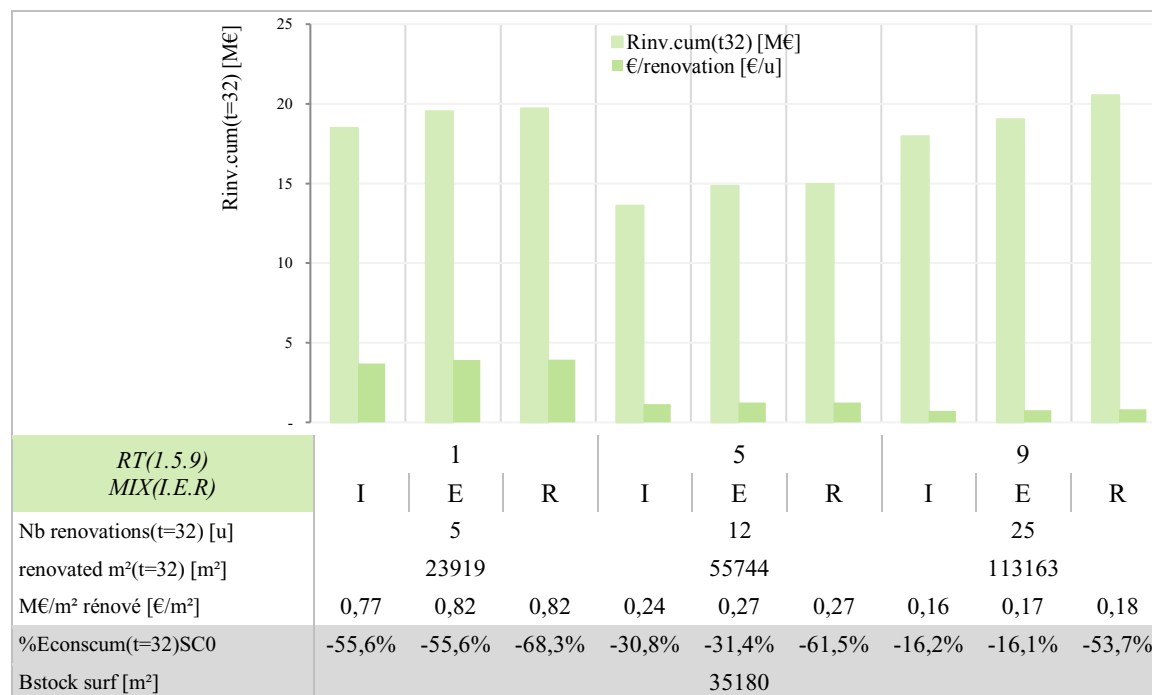


Figure 73. Consommation des ressources humaines et financières : sensibilité à RT-MIX.

Il ressort également de la Figure 73 ci-dessus que les dépenses cumulées de rénovation engendrées par les trois chemins de transition RT sont moins divergentes d'une configuration RT-MIX à l'autre que l'on aurait pu s'y attendre. Le montant global des investissements en rénovation s'élève à 15 M€ en RT 5 et à 20 M€ en RT 1 et RT 9, en dépit de prix et de nombre de rénovations très différents : les rénovations proactives sont 4 à 5 fois plus onéreuses que les rénovations progressives par unité de surface de bâtiment rénové.

On mesure par ailleurs les écarts de prix par m² de surface rénovée : on évalue tout d'abord le surcoût de RT-E, de RT-R par rapport à une stratégie de rénovation RT-I excluant la rénovation du mix (marqueurs vides en Figure 74 ci-dessous). Puis on s'interroge sur le surcoût financier d'une stratégie énergétique très engagée de type RT-MIX=1-R, par rapport aux autres configurations (marqueurs pleins en Figure 74). L'attentisme en matière de rénovation des mix énergétique se justifie-t-il d'un point de vue financier ?

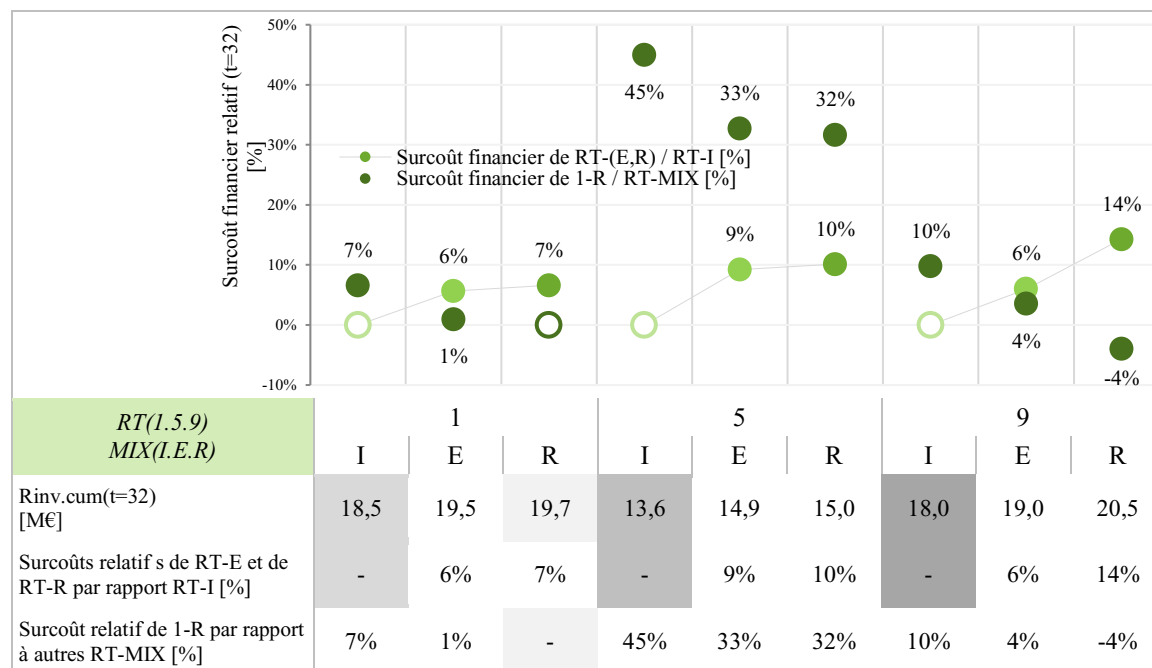


Figure 74. Consommation des ressources financières : sensibilité à RT-MIX.

Les stratégies intégrant le renouvelable engendrent un surcoût de proactivité énergétique d'autant plus important que les rénovations sont séquencées dans le temps, le surcoût mesuré atteint 10 à 14% pour RT 5 et 9 par rapport à la configuration RT 1. Pour les stratégies de rénovation en MIX E, les surcoûts calculés par MACARON sont inférieurs à 10%. Donc entre RT 9 et RT 1, à investissements cumulés identiques, la diminution des objectifs énergétiques ne se justifie pas ici en termes de delta de coûts d'investissement.

Ceci est mis en regard des volumes horaires nécessaires à la réalisation de ces travaux par la main-d'œuvre, du nombre d'interventions et de m² rénovés associés aux configurations RT-MIX. La Figure 75 ci-dessous montre que l'effort humain (volumes horaires) ne suit pas la même évolution que l'effort financier (d'où l'intérêt du trilemme) : ici les rénovations RT 1 ont mobilisé respectivement 2 et 4 fois plus de ressources humaines que les rénovations RT 5 et RT 9 à MIX identique. Le total des interventions pour le chemin de transition proactif ne concerne que 68% du parc : si ce chiffre rappelle une nouvelle fois le poids du gisement d'économies d'énergie dans l'existant, notons alors que le cumul des surfaces rénovées en RT 9 est presque 6 fois plus élevé en raison du nombre élevé de réinterventions sur le parc (phasage des travaux).

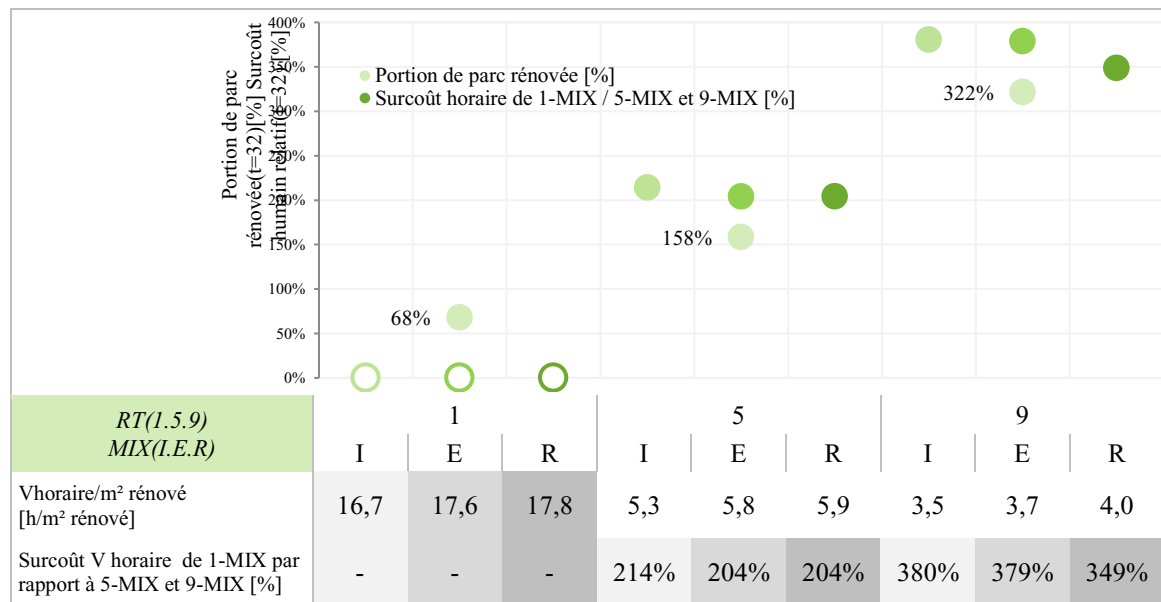


Figure 75. Consommation des ressources humaines : sensibilité à RT-MIX.

L'intérêt de la rénovation des mix énergétiques est répercuté ici : à volumes horaires équivalents, MIX=R génère des gains de consommations tels que l'effort est divisé par 2 en RT 5 et par 3 en RT 9, par rapport à une stratégie MIX I ou E. Le fuel switch incarné pas MIX, nous l'avions pressenti précédemment, participe donc activement à rationaliser les dépenses financières et horaires du gestionnaire pour l'amélioration énergétique du parc.

2.2.4. Non-qualité

Si la teneur exacte de la non-qualité n'a que peu d'intérêt dans l'analyse du présent scénario⁷³, nous souhaitons toutefois dès à présent sensibiliser le lecteur à l'ampleur des impacts de la non-qualité à travers le modèle, afin d'introduire les scénarios qui suivront la présente analyse. Les coûts⁷⁴ de non-qualité sont entendus dans nos travaux à la fois comme des coûts humains et financiers. Le ratio des euros et heures de non-qualité, au prorata des coûts et volumes horaires initialement prévus pour les travaux, donne l'indice de qualité des rénovations. Plus la non-qualité est présente dans les processus opérationnels (chapitre 4 MIRH et MIDN) de l'organisation, plus la performance des rénovations et celle du parc sont affectées. Dans les prochaines sections, nous aborderons notamment les questions de retard et de perte de productivité liés à la non-qualité. Ces questions ayant davantage d'intérêt à être traitées dans une configuration intégrant le BIM, nous nous contenterons ici d'explorer l'évolution des

⁷³ Elle sera en revanche détaillée en SC2.

⁷⁴ Associe les coûts tangibles et la monétisation des heures passées à produire puis gérer la non-qualité (détail au chapitre 5 MERH).

requêtes de rénovation (en termes de nombre et de surface rénover), des montants des investissements cumulés en rénovation sur la période de simulation, des consommations énergétiques du par cet de l'effort qui en découle. La Figure 76 ci-dessous présente de manière synthétique l'ampleur de ces impacts en fonction des configurations RT-MIX les histogrammes rayés et les histogrammes pleins présentent respectivement les résultats obtenus par MACARON selon que la prise en compte de la non-qualité est soit désactivée ou activée dans le modèle. Sur les éléments étudiés on observe un impact variable de la non-qualité : l'impact économique est trois fois plus important sur les flux financiers que sur les flux énergétiques (par exemple 150% de surcoût financiers et -50% de gains de performance énergétique pour la configuration 9-E). Les surfaces rénovées sont les moins impactées par la non-qualité, mais la nature même de leur évolution est surprenante : en RT 1 la surface rénover est insensible à la non-qualité tandis qu'en RT 5 la non-qualité fait diminuer le nombre de m² rénovés (phénomène à associer au séquençage différent des opérations ?). En RT 9 en revanche la surface rénover peut connaître une augmentation allant jusqu'à 25% dans le cas le plus défavorable (9-R).

De manière générale et dans la continuité de ce que nous a révélé SC1 jusque-là, les éléments observés sont d'autant plus sensibles à la non-qualité que le chemin de transition est faible : l'ampleur des impacts de non-qualité sont divergent davantage selon RT que selon MIX dans la plupart des cas. Cela dit les stratégies de rénovation incluant le mix énergétique MIX R se démarquent particulièrement des autres MIX en termes de sensibilité à la non-qualité notamment sur les éléments de coût, d'effort et de gains de performance énergétique à travers le parc.

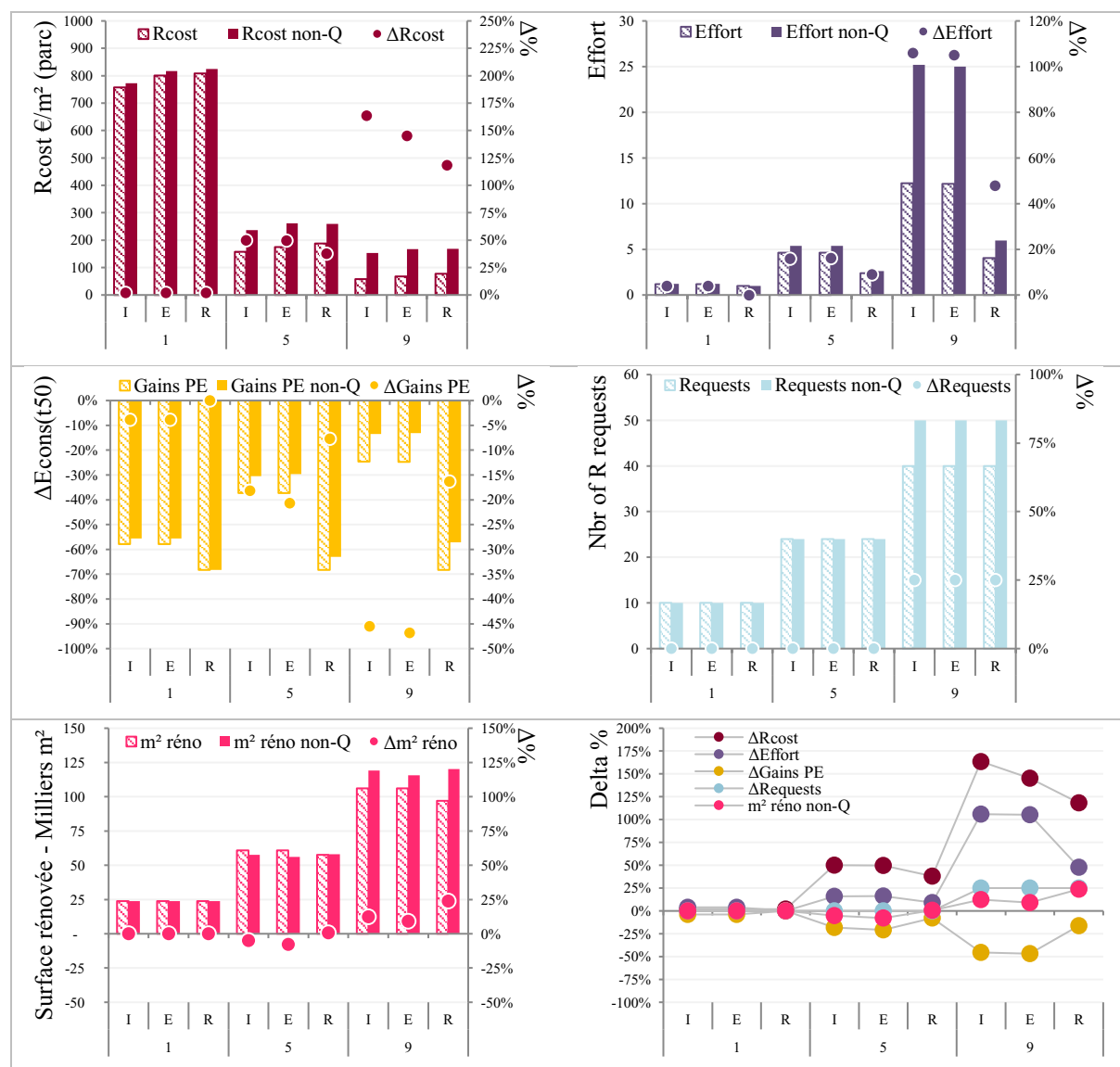


Figure 76. Impacts relatifs de la non-qualité, approche globale : sensibilité à RT-MIX.

2.3. Synthèse SC1 : choix d'une configuration de rénovation énergétique

En SC1, les hypothèses de coûts des rénovations formulées dans le modèle ne contraignent pas financièrement le gestionnaire, lequel ne recourt à aucun report d'opération même dans les contextes les plus défavorables (réinterventions, Haute Performance Énergétique ou décarbonation). Le parc C analysé dans un contexte particulièrement défavorable (PP.VV.VL-RT.MIX = C4N-1R identifié précédemment) révèle de même une sensibilité très limitée à la contrainte financière des investissements énergétiques : un seul report des opérations est mesuré pour quatorze rénovations effectuées sur un total de quinze requêtes. Si la décarbonation est difficilement valorisable (exemple des *kWhcumac*), elle représente ici une opportunité de diminuer considérablement notre dépendance aux énergies fossiles.

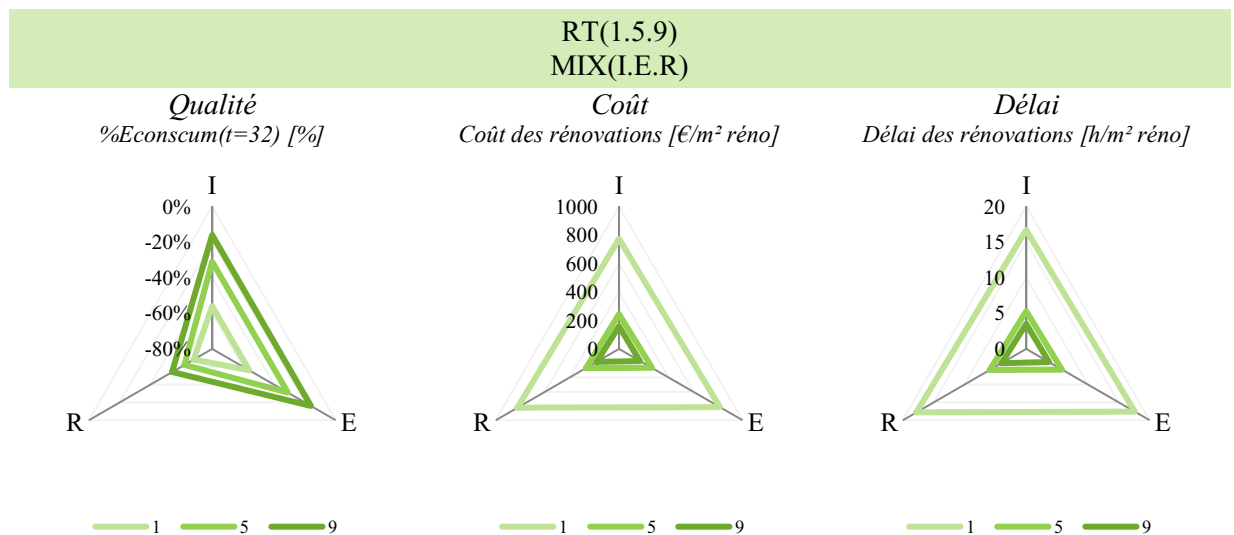


Figure 77. Synthèse RT-MIX : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations.

De manière assez générale, les chemins de transition progressifs consomment moins de ressources financières et humaines que le chemin de transition proactif.

Par ailleurs, au-delà des politiques publiques et des stratégies de décarbonation du parc, il est à noter que la non-qualité a un impact significatif : c'est un facteur qui pourrait encore ralentir la recherche de performance énergétique globale.

Comment améliorer cette situation pour l'investisseur ? Le numérique peut-il résorber certains coûts, améliorer la productivité ou la qualité de sorte que le bilan soit plus favorable ? Le scénario SC2 va répondre à ces questions, en prenant pour référence :

SC - PP VVI VL - RT MIX

CODE: 1 - E 1 Y - 5 1

1-E1Y-51 - Sensibilité

SC 1	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE							RESS. HUMAINES		ECONOMIE			
	E	VL			I	E	R	0	1	2	3	4	5	MAT		M	N	P			
		X	Y	N										1	2						
VW	4	1	0																		

• Computed configuration

Initial conditions (not tested)

PP E: Social dwell

Figure 78. Tableau de synthèse SC1 : choix d'une configuration de rénovation énergétique.

3. Scénario SC2 : E1Y-5I-FORM-LOD

3.1. Paramètres FORM-LOD et causalités simplifiées

Dans cette section MACARON investigate la variation des objectifs de formation (FORM) et de numérisation du parc (LOD) choisis par le décideur sur l'efficacité des rénovations. Le scénario SC2 explore les interrelations associant type de mission numérique et évolution des moyens dédiés pour l'exploitation du parc sur la période considérée. Déplacement des volumes horaires et financiers à l'adoption du BIM et évolution des capacités humaines en interne sont analysés au regard du bilan énergétique du parc : on cherchera ainsi à caractériser l'impact la stratégie numérgétique du décideur sur le niveau de performance atteint par le parc en SC1. La Figure 79 et l'arbre des causalités en Figure 80 résument les configurations qui seront testées par le présent scénario SC2 et les causalités mises en jeu dans MACARON.

[illegible]

Figure 79. SC2 : Analyses de sensibilité FORM-LOD.

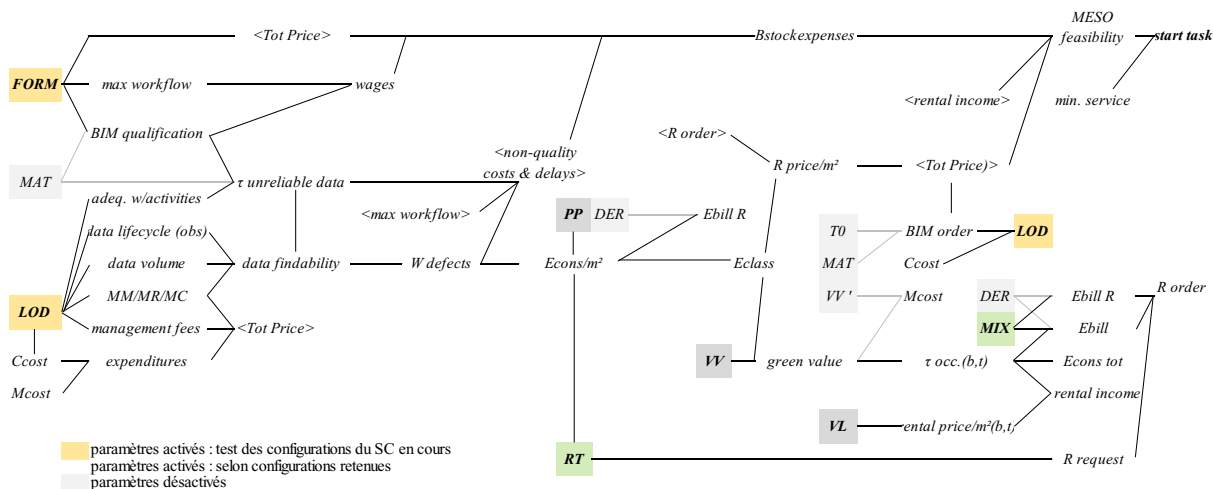


Figure 80. Arbre des causalités simplifié SC2.

La Table 58 en page suivante donne les caractéristiques des configurations retenues pour la modélisation dynamique de FORM et LOD dans MACARON. On peut d’ores et déjà admettre au vu des relations de causalité concernées par FORM et LOD que l’impact de ces paramètres concernera principalement le coût global des stratégies numergétiques envisagées, les volumes horaires de travaux et la qualité technique de ceux-ci.

Table 58. Caractéristiques des paramètres PP, VV et VL.

Stratégie de formation des effectifs BIM (FORM)	Intensité de la numérisation : niveau de détail (LOD)	
0 Pas de formation des effectifs autres que : <i>Level 0</i> : Bases bureautiques	0 <i>No BIM</i>	Idem SC0 : non-numérisation du parc (<i>LOD0</i>)
1 Formation de 100% des effectifs : <i>Level 1</i> : Fondamentaux BIM <i>Level 2</i> : BIM pour GPI Maîtrise d'Ouvrage Hypothèses de coûts et temps passés en chapitre 5 (MERH).	1 <i>LOD100</i> 2 <i>LOD200</i> 3 <i>LOD300</i> 4 <i>LOD400</i> 5 <i>LOD500</i>	LOD est ici entendu au sens de niveau de développement (voir chapitre 1). Dans nos hypothèses de modélisation (chapitres 3 et 5), nous avons rapproché le LOD de la notion de volume de données, que MACARON traite sous la forme du nombre d'attributs composant les modèles BIM, du contenu de connaissances le plus pauvre (<i>LOD100</i> : boîtes géo-localisées) au plus élevé (<i>LOD500</i> : jumeau numérique). Détail en annexe 2.

Dans ces travaux on envisage la régularité des formations, leur mise à jour, comme cruciale dans la pérennisation et la rentabilité des investissements BIM. Or ce facteur relève potentiellement de la stratégie du décideur : fait-il le choix de former les effectifs selon une stratégie opportuniste ou systématique ? Nous avons fait le choix ici, plutôt que d'imposer un rythme (annuel, biennal...) de formation, de créer une boucle de rétroaction impliquant le niveau de BIM qualification(t) de l'organisation sur le déclenchement des requêtes de formation, lesquelles sont alors générées lorsque *BIM qualification(t)* devient inférieur à 80%. MACARON considère en outre que les formations sont menées sur une année lorsqu'elles sont acceptées.

LOD a un impact fort sur les dépenses de l'organisation :

- *expenditures(t)* les coûts de maintenance (résorption des coûts de nettoyage)
- *Info, manage(t)* les coûts de gestion SI^{75} et RH (déplacement des coûts)
- *BIM CR(t)* les investissements BIM (voir annexe 1)
- *BIM M(t)* les coûts de maintenance des modèles BIM
- *Rcost* l'investissement rénovation BIM-centrée : $m=(R+MR)$
- sachant que les éléments ci-dessus composent les dépenses parc *Bstock expenses(t)*

Les formations sont d'autant plus onéreuses que le LOD est élevé : FORM1 contribue ainsi à renforcer la contrainte financière qui s'exerce sur l'organisation en fonction de la stratégie de numérisation choisie par le gestionnaire.

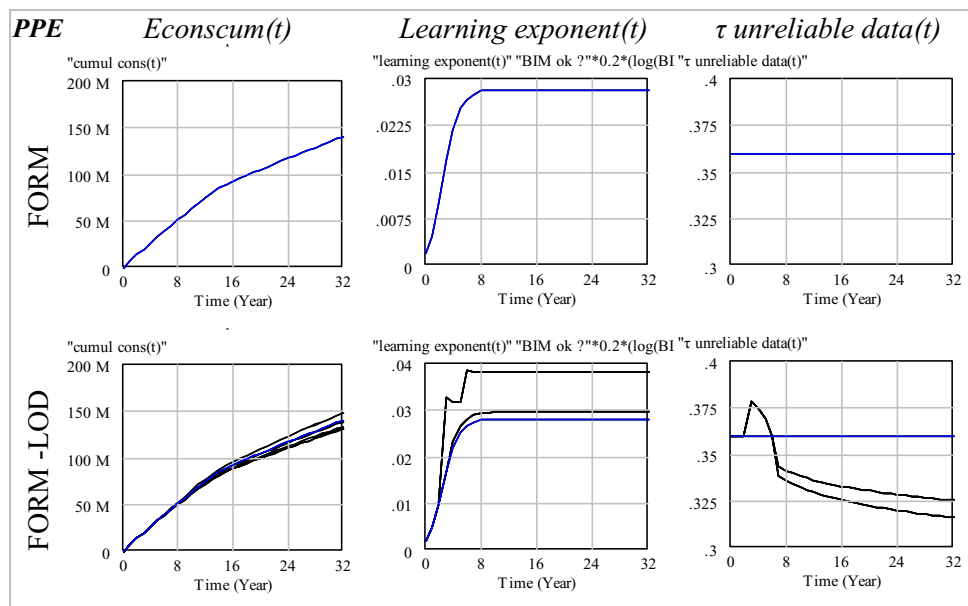


Figure 81. Tableau des impacts de FORM et LOD sur les consommations énergétiques (kWhep), le coefficient d'apprentissage de l'organisation et le taux de données non fiables.

⁷⁵ Système d'Information.

FORM a en outre un impact certain sur $BIM\ qualification(t)$, le niveau de qualification BIM global de l'organisation atteint par les effectifs formés, lequel lui-même affecte fortement la capacité de l'organisation à tirer profit du BIM, le $learning\ exponent(t)$. La rencontre de LOD et FORM provoque ainsi des variations visibles de la qualité de la gestion de données $\tau\ unreliable\ data(t)$ et de la ressource informationnelle rendue disponible $data\ findability(t)$.

Or ces variables sont, dans MACARON, considérées comme de potentiels vecteurs de gain de qualité et de performance des rénovations BIM, à travers la résorption de la non-qualité au sein des processus opérationnels de l'organisation.

Le numérique permet-il effectivement de renforcer, ou au moins de maintenir les gains de performance énergétique atteints sans BIM en SC1 ? Quels impacts sur les pendants humains et financiers en considérant que R devient R+MR+MC et M devient M+MM⁷⁶ ? Nos objectifs de simulation pour l'analyse des résultats de SC2 sont présentés en Table 59.

Table 59. Rappel des objectifs de simulation de SC2.

Éléments du trilemme QCD	
Q	Gains TW_{hep}
	Gains TW_{cumac}
	Qualité des rénovations
	Qualité des flux de données
C	Qualification BIM
	Capacité financière
	Consommation des ressources financières
D	Non-qualité : Surcoût
	Consommation des ressources humaines
	Rénovations reportées

3.2. Analyse des résultats de SC2 : E1Y-5I-FORM-LOD

3.2.1. Qualification BIM et qualité des rénovations

Cette section a pour but de mettre en évidence le rôle de la formation des effectifs dans l'amélioration des processus opérationnels de l'organisation gestionnaire. Nous avons d'ores et déjà explicité le lien étroit qui existe entre l'intensité de numérisation retenue par le décideur, le LOD, et les besoins de formation associés. Ici on s'intéresse dans un premier temps aux dynamiques d'évolution de la compétence interne : $BIM\ qualification(t)$ le niveau global de qualification BIM à l'échelle de l'équipe de travail, $Learning\ exponent(t)$ la capacité d'apprentissage organisationnel et $\tau\ unreliable\ data(t)$ le flux de non-qualité en gestion de données (équivalant un taux d'erreurs/heure travaillée). Ces éléments ne dépendent pas directement du LOD : les LOD n'ont d'impact que sur les dépenses et les volumes horaires dédiés à la formation. On évalue ici les conséquences éventuelles du non-respect des préconisations de formation des effectifs ce qui n'introduit aucune variation sur les LOD, au contraire de la variable $\tau\ unprod.\ time(t)$ le ratio initial de temps improductifs en gestion de données, dont le calcul tient compte des gains potentiels liés à l'adéquation du LOD aux activités (voir annexe 1).

La Figure 82 synthétise les résultats obtenus dans MACARON pour ces quatre éléments, dans les différentes configurations de FORM-LOD.

⁷⁶ Voir table des indices, indice m.

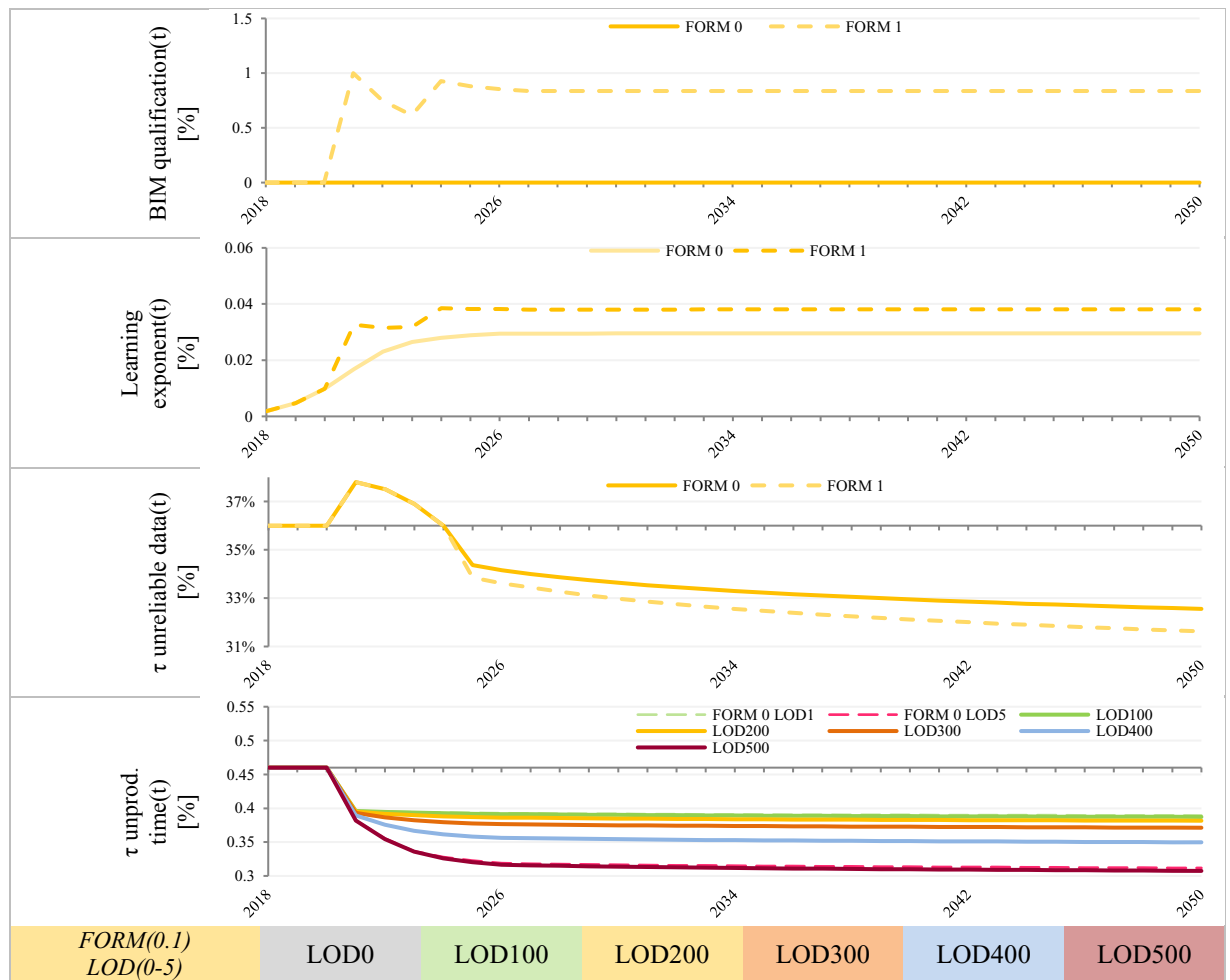


Figure 82. Niveau de qualification BIM et temps de formation associés : sensibilité à FORM-LOD et impacts sur l'apprentissage organisationnel et les flux de gestion de données qui en découlent.

On observe dans la configuration actuelle du modèle que FORM 1 engendre deux cycles de formation (pentes croissantes de $BIM\ qualification(t)$). Notre hypothèse est que le nombre de cycles de formation BIM peut-être, en plus de LOD et FORM, également sensible à la variation de T_0 et MAT : on regardera en SC3 le niveau de contrainte qui résulte de la rencontre de ces paramètres sur le rythme d'évolution de $BIM\ qualification(t)$.

Rappelons que les requêtes de formation sont ici générées lorsque $BIM\ qualification(t)$ devient inférieur à 80%. Or on remarque ici que $BIM\ qualification(t)$ atteint la valeur minimale de 60% entre deux cycles de formation : ceci est dû au délai qui existe entre ordres de formation et acquisition de compétences. La décroissance du niveau de qualification est plus prononcée après le premier cycle de formation qu'après le second : on attribue cela à la forme sigmoïdale de MAT qui est à l'origine de l'obsolescence du niveau de qualification de l'organisation (SC3 explorera la variation de MAT). $BIM\ qualification(t)$ ne varie plus après 2027 : le niveau de qualification s'est stabilisé autour de 84% une fois atteinte la pleine maturité technologique du BIM ($MAT=100\%$).

La variable d'apprentissage organisationnel représente dans MACARON la capacité de l'organisation à faire diminuer le temps nécessaire à la création d'un produit, au fur et à mesure que le nombre de produit réalisés augmente selon (Lee, 2012). Il est explicité dans la littérature scientifique que les coefficients d'apprentissage estimés pour les secteurs de l'industrie relèvent de nombreux facteurs eux-mêmes mal identifiés. Nous nous sommes emparés des limites de cette théorie pour proposer dans MACARON un coefficient d'apprentissage organisationnel du gestionnaire fonction à la fois de la qualification, l'expérience, la maturité technologique.

La Figure 82 ci-dessus présente l'évolution de ce coefficient d'apprentissage $Learning\ exponent(t)$ selon que la formation des effectifs est activée ou non (LOD n'a pas d'impact sur cet élément, voir ci-dessus). Dans un contexte identique (date de déploiement et maturité exogène), la formation des

effectifs permet une amélioration d'environ un point du coefficient d'apprentissage (stabilisé à environ 3% sans formation, environ 4% si les effectifs sont formés selon les préconisations expertes). Cet écart se répercute sur $\tau_{unreliable\ data}(t)$, le ratio d'erreurs commises par les effectifs par heure travaillée en gestion de données. L'évolution des ratios de temps improductifs en gestion de données $\tau_{unprod.time}(t)$ sont quant à eux sensibles aux LOD : cela est dû aux différents avantages associés à chacun d'eux en fonction de l'adéquation du niveau de numérisation avec les activités du gestionnaire tel qu'explicité en MEDN et annexe 1. L'impact du coefficient d'apprentissage et des formations auxquelles il est sensible est en revanche quasi nul : il est invisible en LOD100 (stabilisation à -5% du ratio de temps improductif initial) et négligeable en LOD 500 (stabilisation à environ -15% et moins de 0,5% d'écart entre FORM 0 et FORM 1).

Les éléments $BIM\ qualification(t)$, $Learning\ exponent(t)$, $\tau_{unreliable\ data}(t)$, $\tau_{unprod.time}(t)$, nous l'introduisons ci-avant, possèdent des liens de causalité directs avec la qualité des processus opérationnels de gestion de données $qDM(t)$ et de rénovation $qR(t)$. Les résultats précédents ayant montré l'absence d'impact de FORM sur les éléments qui dépendent du coefficient d'apprentissage, on s'attend à ce qu'un allongement de la relation causale dilue encore cet impact sur les variables $qDM(t)$, $data\ findability(t)$ et $qR(t)$. La Figure 83 ci-dessous synthétise les résultats obtenus dans MACARON pour ces éléments, dans les différentes configurations de FORM-LOD, afin de vérifier notre intuition.

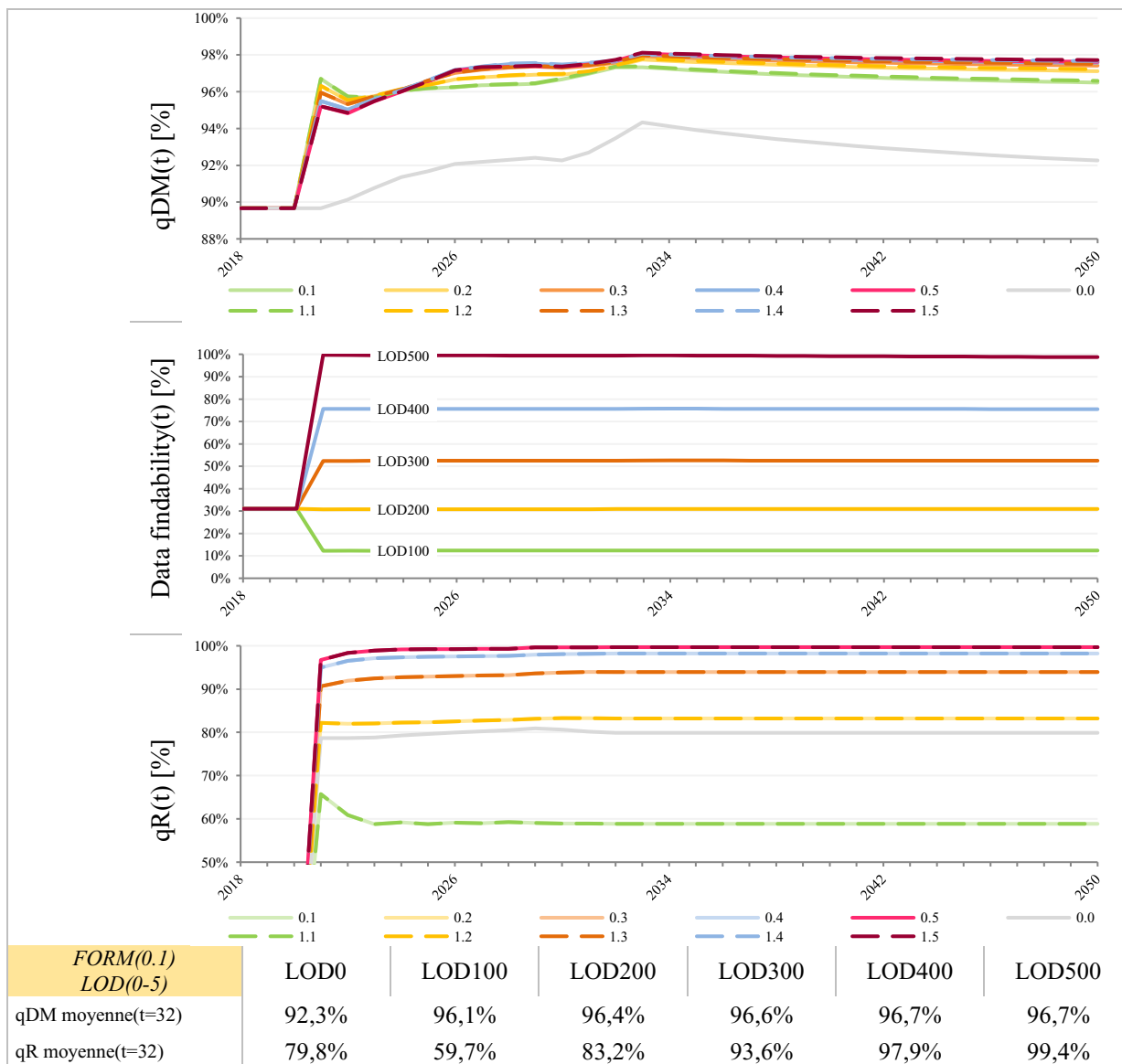


Figure 83. Qualité des flux de gestion de données, trouvabilité de l'information et impact sur la qualité des travaux : sensibilité à FORM-LOD.

Ici on n'identifie plus aucun effet des formations BIM : $qDM(t)$, $data\ findability(t)$ et $qR(t)$ ne présentent des comportements distincts que pour différentes valeurs de LOD.

On observe :

- $qDM(t)$ présente un écart de 4 à 5 points qui se maintient dans le temps entre une situation sans BIM (LOD0) et une situation BIM-centrée (LOD 1 à 5) ; les valeurs de $qDM(t)$ sont très élevées (96% et 92% respectivement avec et sans BIM). On peut raisonnablement supposer que cela est en partie dû à la politique qualité interne introduite en chapitre 4 MIRH-DN : tous les défauts découverts sont corrigés ; s'il y en a un, l'impact devrait être plutôt financier, sur les surcoûts de non-qualité et la capacité financière.
- $Data\ findability(t)$ montre que l'excellente qualité de la gestion de données mentionnée ci-dessus ne provoque aucune altération de la trouvabilité des données, laquelle n'est ici soumise qu'à la richesse des données contenues dans les différents LOD.
- $qR(t)$ est fortement impacté par la trouvabilité des données, mais on voit que les écarts obtenus entre les LOD ne sont pas de la même ampleur que pour $data\ findability(t)$; les LOD élevés permettent une qualité des processus exemplaires : 98% et 99% de moyenne sur la période de simulation pour les LOD 4 et 5 respectivement.

Dans la Figure 84, on regarde l'impact des volumes de données sur l'ampleur des gains engendrés sur $qR(t)$: un LOD 5 contient plus de deux fois le volume d'informations d'un LOD 2 (dont le volume de données est considéré être le même qu'en LOD 0), et génère un gain de qualité relatif de 25% sur $qR(t)$. Notre hypothèse initiale était que la disponibilité des données avait un fort impact potentiel sur le niveau de qualité des rénovations, or ici on observe que l'écart de trouvabilité entre les LOD n'engendre qu'un moindre écart de qualité des travaux. Il faudra certainement revisiter le paramétrage de cette relation causale.

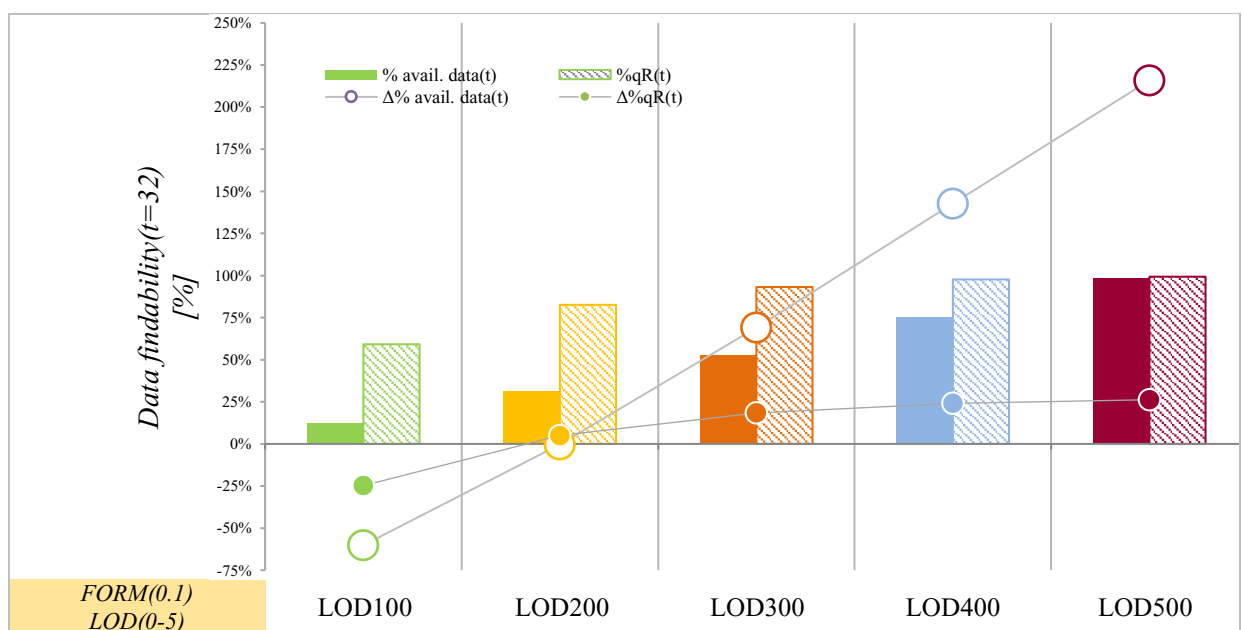


Figure 84. Impact de la trouvabilité des données sur la qualité moyenne annuelle des rénovations : sensibilité à LOD.

3.2.2. Gains de performance énergétique

On s'intéresse à présent aux conséquences de la qualité des rénovations $qR(t)$, telle qu'analysée dans la section précédente, sur la performance énergétique globale du parc sur la période considérée. Comme en SC1, on envisage l'évaluation de l'efficacité des stratégies de rénovation sous les aspects des consommations énergétiques évitées en TWh_{ep} bruts, et des consommations énergétiques évitées TWh_{ef} cumulés actualisés, engendrés à horizon de simulation par les différentes configurations de LOD (FORM ne produira plus d'effets tangibles autres que ceux précédemment étudiés, dans la suite de l'analyse de la qualité des flux). La Figure 85 page suivante présente les écarts relatifs à SC0 et SC1 des consommations cumulées de PP E en TWh_{ep} et des gains $TWh_{cumac}(t=32)$ dans les différentes configurations de LOD.

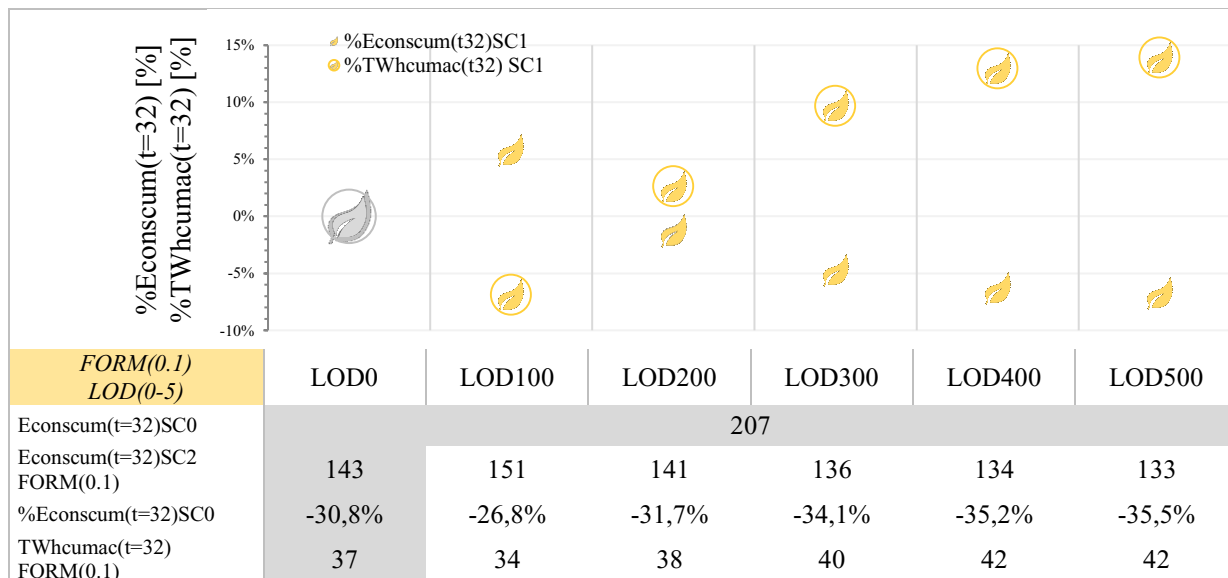


Figure 85. Ecart relatif à SC0 et SC1 des consommations cumulées de PP E en TWhep et des gains TWheumac(t=32) : sensibilité à FORM-LOD.

La confrontation entre SC2 et SC0 montre que le BIM conduit toujours à un résultat positif sur le plan énergétique. Mais comparés aux résultats obtenus en SC1 (actuel LOD0), les gains de performance réalisés en fonction du LOD activé ne sont pas toujours avantageux : le LOD 1 constitue, sans réelle surprise au vu des résultats précédents, une situation défavorable par rapport à la situation sans BIM. Cette stratégie de numérisation diminue les performances atteintes en SC1 d'environ 5%. Tous les autres LOD présentent un delta de performance favorable par rapport à la situation SC1. Ce gain est d'autant plus intéressant que le LOD est élevé : le LOD 2 présente un gain de performance absolu d'environ 1%. Il atteint entre 4% et 5% à l'activation des LOD 3 à 5. Cela représente une performance relative jusqu'à 7% supérieure à celle obtenue en SC1 pour le LOD 5.

3.2.3. Évolution de la capacité financière

Dans cette section on souhaite mettre en évidence l'impact des rénovations BIM-centrées sur la variation de la capacité financière de l'organisation mesurée en SC1. Pour rappel elle résulte de la confrontation des dynamiques de coûts et de fréquence des rénovations, et de la variation d'occupation du parc amélioré. Dans le présent scénario le calcul de la capacité financière intègre de surcroît les coûts et les gains associés à la mise en œuvre du BIM en interne. La Figure 86 page suivante présente les montants, en €/m²loué/an de capacité financière, dégagés par l'activité de gestion de patrimoine BIM-centrée dans les différentes configurations de FORM-LOD.

SC2 engendre des variations notables de la balance financière par rapport à une situation SC1, sur toutes les configurations de FORM-LOD. Contre toute attente, les investissements BIM, loin de détériorer la situation obtenue en SC1, améliorent la capacité financière de l'organisation, que les effectifs soient formés ou non. FORM 1 génère par ailleurs une meilleure capacité financière que FORM 0 quel que soit le LOD analysé. Et pourtant on ne mesure aucun écart significatif lorsque les flux de trésorerie sont ramenés aux m² loués : en FORM 0 et FORM 1, en dépit de dépenses nécessairement différentes liées aux frais de formations engagés dans un cas et pas dans l'autre, on obtient la même valeur pour la capacité financière de l'organisation (pour un même LOD). Sur la période considérée, les coûts de formation ne sont donc pas à l'origine de dérives importantes de la capacité d'investissement de l'organisation. Le LOD en revanche fait varier en l'augmentant la valeur de la capacité financière calculée en SC1 de 0,6% (LOD 4) à 4,6% (LOD 1). Dans le cas présent, et contrairement aux conclusions établies dans les sections précédentes, le LOD 1 est sans conteste le plus performant sur un plan économique. Cela s'explique par l'absence ou la moindre teneur des investissements consentis en LOD 1 et LOD 2, lesquels permettent de dégager une marge plus importante que les LOD supérieurs : les avantages tangibles et intangibles du BIM ont un rendement plus efficace sur ces investissements moins importants. Quoiqu'il en soit, et même si ces gains sont relativement peu élevés sur des volumes de données importants, dans MACARON la balance des

coûts-avantages du BIM est positive pour le gestionnaire et lui permet d'améliorer sa capacité d'investissement et non de la restreindre.

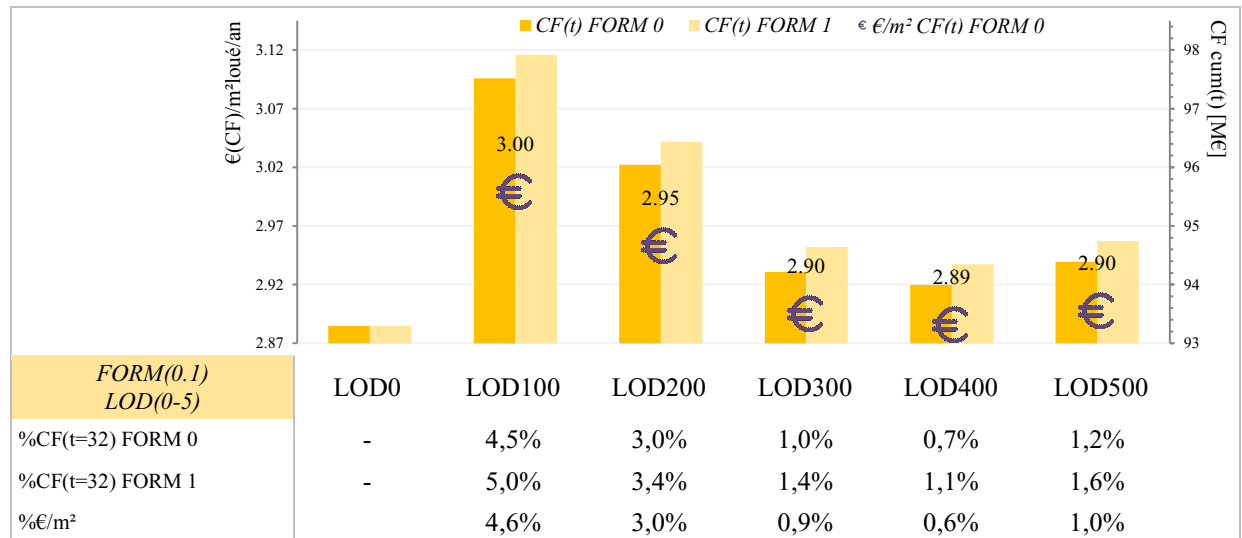


Figure 86. Capacité financière [€/m² loué/an] : sensibilité à FORM-LOD.

Note : pour rappel le coefficient d'attractivité moyen du parc n'a de raison de varier sur la période de simulation que si la performance énergétique engendrée au cours du temps connaît de fortes variations, ici ce ne sera plus le cas en comparant SC1 et SC2 qui réalisent le même scénario de rénovation. Donc pas de delta sur les surfaces occupées : les variations de la capacité financière ont pour seule cause le delta des montants d'investissements engagés et leurs impacts diffus sur les coûts du modèle. Le delta de performance relative, de seulement quelques points au maximum, n'est plus ici de taille à faire varier l'attractivité moyenne du parc.

De la même manière, on ne décèle pas non plus ici de *delayed requests* : aucune opération de rénovation n'a été ajournée par manque de moyens financiers pour assurer les investissements énergétiques. Même dans la configuration CN4-1R-15 la plus défavorable, présente toujours 7% de rénovations reportées, soit pas d'évolution par rapport à la situation SC1.

3.2.4. Consommation de ressources internes : volumes financiers/horaires

Pour rappel, les différents postes de dépense de l'organisation sont organisés dans MACARON tel que présenté dans le tableau synthétique Table 60.

Table 60. Rappel synthétique de la structure des postes de dépenses appliqués dans MACARON.

	Dépenses d'investissement		Dépenses courantes	
	<i>R investment(t)</i>	<i>BIM investment(t)</i>	<i>Ope.costs(t)</i>	<i>Expenditures(t)</i>
Postes de dépenses prévisionnelles	Investissements pour la rénovation des bâtiments	Investissement pour la construction des modèles BIM	Mise à jour formations	Maintenance des bâtiments
		Investissements pour la mutation du système d'information	Entretien de l'environnement logiciel et du système d'information	Nettoyage des bâtiments
		Investissement initial pour la formation des effectifs	Maintenance des modèles BIM	
		Investissements logiciels initiaux	Salaires ⁷⁷	
		Rénovation des modèles BIM		
+	Surcoûts de non-qualité associés à l'externalisation de tâches non achevées en interne.			

⁷⁷ On isolera la part des salaires affectée aux missions R, et MR quand utile pour analyse fine des investissements $R\ investment(t)SC1[R]$ et $R\ investment(t)SC1[R+MR]$.

Les surcoûts de non-qualité ne sont calculés que pour les missions M, R, MM, MR présentées en chapitre 5. On cherche dans cette section à évaluer l'ampleur de la variation, entre SC1 et SC2, du coût des rénovations $\%R\ investment(t)SC1[R]$. Quel est l'impact du BIM sur les coûts de non-qualité en rénovation ?

On s'intéresse par ailleurs à l'évolution du coût des rénovations lorsqu'y est intégré le coût de rénovation des modèles de données BIM : les montants des investissements en rénovation et en numérisation sont appréhendés non plus individuellement mais sous la forme d'investissements numergétiques lesquels additionnent alors les coûts des missions R et MR.

En SC1, $R\ investment(t)SC1[R+MR] = R\ investment(t)SC1[R]$. On y confrontera les montants d'investissements engagés par SC2[R] et SC2[R+MR] : on considère MR non-plus comme un investissement BIM mais comme un « surinvestissement en rénovation ».

Nous avons montré dans la section précédente que FORM n'a pas d'impact significatif sur la capacité financière globale de l'organisation sur la période de temps considérée. Les résultats présentés dans cette section s'appuient sur la configuration FORM 1, *a priori* la plus défavorable pour le gestionnaire sur le plan économique. La Figure 87 ci-dessous présente et analyse :

- Les montants en M€ investis pour la mise en œuvre du BIM et pour les opérations de rénovation (histogrammes cumulés),
- Le surcoût relatif que représente la mission R+MR en SC2 par rapport à la mission R+MR en SC1, $\%SC1\ (R+MR)$,
- Le surcoût relatif que représente la mission R+MR en SC2 par rapport à la mission R seule en SC2, $\%SC2\ (R+MR)$.



Figure 87. Consommation de ressources financières pour les investissements : sensibilité à LOD.

Les investissements BIM cumulés sont d'autant plus importants que le LOD est élevé ce qui correspond effectivement aux hypothèses de modélisation utilisées dans MACARON ; tel n'est pas le cas en rénovation puisqu'on observe le comportement inverse pour $\%SC1\ (R+MR)$ (l'écart relatif de

SC2(R+MR) par rapport à LOD0 équivalant SC1) : un LOD 1 provoque un surinvestissement en rénovation de plus d'un million d'euros par rapport à une situation sans BIM en SC1. Les LOD 2 à 5 en revanche diminuent le volume des investissements cumulés engagés d'environ un million d'euros en LOD 2 et de près de 4 millions d'euros cumulés en LOD 4 et 5. Dans une telle configuration le BIM permet ici des économies de près de 25% sur les dépenses cumulées pour la rénovation du parc par rapport à une situation sans BIM ! Ainsi en LOD 2, 3 et 4 on observe que la somme des investissements cumulés pour le BIM et les rénovations reste inférieure aux seuls investissements en rénovation générés en SC1 : le BIM est pour ces LOD et dans la configuration actuelle du modèle, facteur de performance économique des investissements énergétiques. La balance des dynamiques financières positives et négatives de l'adoption du BIM par le gestionnaire s'est trouvée ici être la plus favorable en LOD 4 : ce LOD sans être optimal possède en effet un excellent taux d'adéquation aux activités de gestion de patrimoine et donc des avantages visiblement non négligeables lesquels, en dépit d'investissements BIM importants, compensent ces dépenses de manière efficace.

Les surcoûts engendrés par les missions MR varient de 0,2% (LOD 1) à 2,6% (LOD 5) du prix initial des rénovations. On aurait pu s'attendre à ce que plus il y ait de contenus dans la mission MR (donc plus le LOD est élevé, à stratégie énergétique identique) plus le surcoût soit important. C'est bien le cas mais on voit qu'en LOD 5 MC+MR représentent 95%, soit la quasi-totalité de l'investissement BIM sur la période considérée. Aussi, grâce à la diminution des montants d'investissements en rénovation, les investissements BIM ne représentent qu'un faible surcoût de 2,6% des rénovations.

La Table 61 ci-dessous détaille les montants des investissements ci-avant présentés ramenés à la surface rénovée dans chaque configuration : ici encore on assimile les surfaces rénovées à la notion d'effort. Plus on rénove de m² sur le parc, plus les consommations de ressources humaines et financières sont importantes et doivent être justifiées par la performance énergétique des rénovations. On compare ainsi les coûts de revient des missions de rénovation R seules et leur pendant numergétique R+MR pour chaque LOD au prix de revient qui avait été déterminé par le modèle en SC1.

Table 61. Consommation des ressources financières : sensibilité à LOD.

	LOD0	LOD100	LOD200	LOD300	LOD400	LOD500
renovated m ² (t=32) [m ²]	55744	57620	55744	55543	56146	56280
k€ (R)/m ² rénové [€/m ²]		259,8	232,7	195,4	180,8	182,7
%SC1 € R/m ² [%]		6,5%	-4,6%	-19,9%	-25,9%	-25,1%
k€ (R+MR)/m ² rénové [€/m ²]	244,0	259,02	231,66	194,03	178,35	177,91
%SC1 € R+MR /m ² [%]		6,1%	-5,1%	-20,5%	-26,9%	-27,1%

En Table 61 ci-dessus, seul le LOD 3 rénove une surface moins importante qu'en situation SC1 : tous les autres LOD demandent un effort supplémentaire. Le LOD 1 illustre une nouvelle fois ici une situation défavorable : en mission R seule, l'adoption d'un LOD 1 génère 6,5% de surcoûts par unité de surface par rapport à la situation de référence et s'ils sont diminués par la prise en compte des missions R+MR, cela ne suffit pas à rendre cette configuration intéressante par rapport à une stratégie sans BIM. Tous les autres LOD confirment les résultats obtenus précédemment à savoir en missions R une diminution de 5% (LOD 2) à 25% (LOD 5) du coût des missions engagées, encore réduit d'1% à 2% par la vision numergétique R+MR.

La Figure 88 en page suivante analyse encore un peu plus finement le détail des dépenses du gestionnaire sur le période considérée : on s'intéresse cette fois aux dépenses courantes d'exploitation, lesquelles comprennent dans MACARON les dépenses d'entretien-maintenance (MICF) *expenditures(t)* et les dépenses de fonctionnement (MECF) *ope.costs(t)*. Ces postes de dépenses ne sont pas impactés par le BIM de la même manière : le montant annuel de *expenditures(t)* se compose d'une part des frais de nettoyage des bâtiments *Ccosts(t)* lesquels sont directement affectés par l'adoption du BIM, considérée dans MACARON comme un vecteur d'économies financières à associer à une meilleure connaissance des surfaces du parc. Pour rappel les frais de maintenance des bâtiments du parc *Mcosts(t)* sont calculés sur la base de leur valeur hors foncier, laquelle varie en fonction de leur performance énergétique par la prise en compte de la valeur verte : ici les effets du BIM ne transitent que par la performance énergétique, lorsque la valeur verte VV' est activée (voir

SC4). Tel ne sera pas le cas dans ce scénario : les variations de dépenses(t) seront entièrement attribuées à celles des coûts de nettoyage $Ccosts(t)$. Le montant annuel de $ope.costs(t)$ se compose quant à lui de postes de dépenses directement impactés par l'adoption du BIM : les coûts de mise à jour des formations, l'entretien des modèles BIM et du système d'information qui les supporte notamment. On observe le cumul de ces dépenses sur la période considérée pour chaque LOD et on le compare au montant obtenu en SC1 pour identifier les gisements potentiels d'économies financières les plus importants lors de l'exploitation du parc.

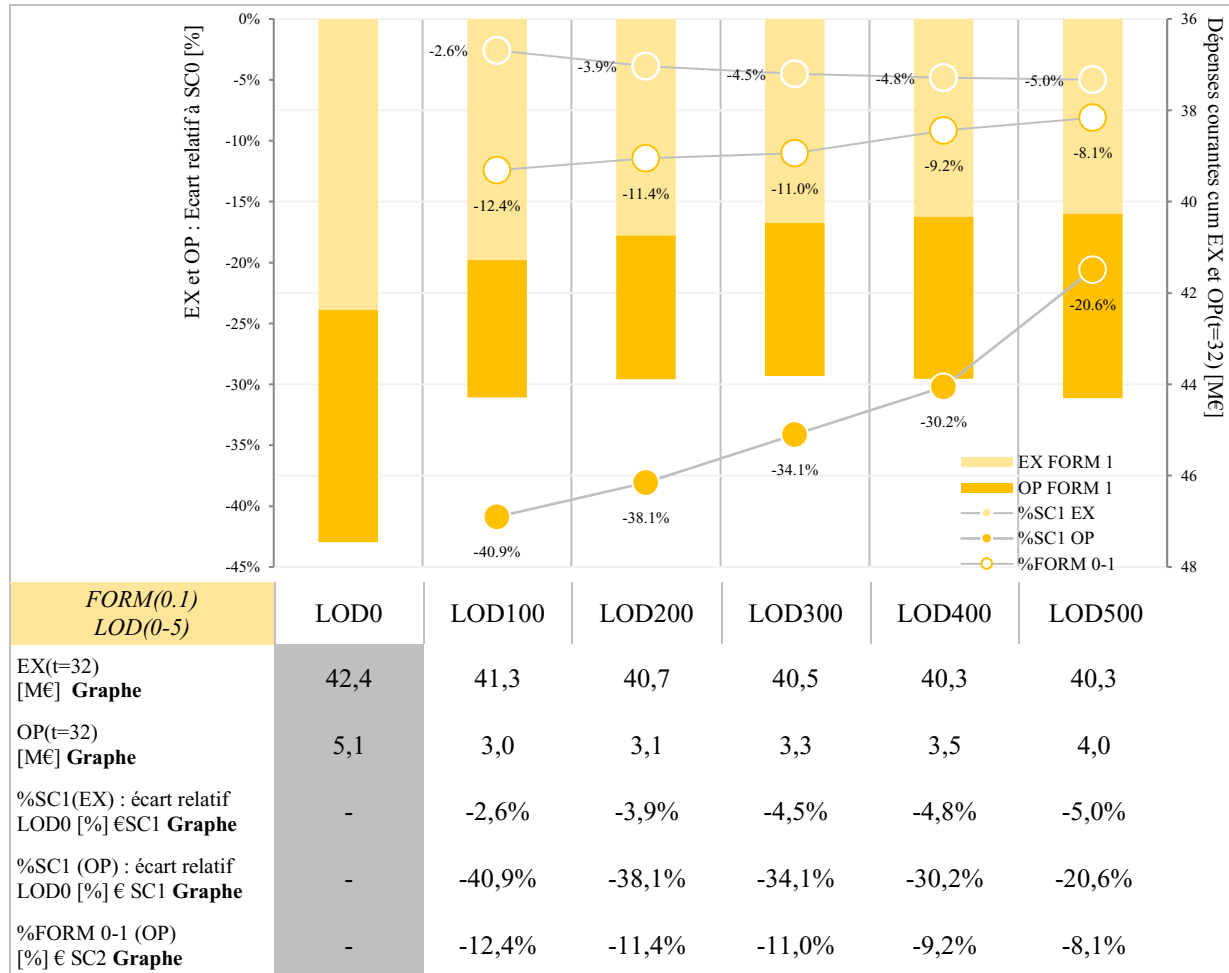


Figure 88. Consommation de ressources financières pour les dépenses courantes EX et OP : sensibilité à FORM-LOD.

Ici tous les LOD, y compris le LOD 1, ont généré des économies de 1 à 2 M€ sur les dépenses d'entretien-maintenance générées en SC1, ce qui représente environ 3% (LOD 1) à 5% (LOD 5) d'écart relatif à SC1. Les effets mesurés sur les coûts de fonctionnement sont encore plus remarquables : ici le BIM fait diminuer les coûts de fonctionnement de 20% (LOD 5) à 40% (LOD1) par rapport à une situation SC1 ! On remarque que les dépenses courantes sont identiques en LOD 1 et en LOD 5 seule les proportions des coûts de maintenance et de fonctionnement changent. Les coûts de fonctionnement sont d'autant moins importants que le LOD est faible, ce qui explique pour $ope.costs(t)$ une performance financière d'autant meilleure en apparence que le LOD décroît. Un élément surprenant ici est que la formation des effectifs, au lieu de faire augmenter les coûts de fonctionnement, les résorbe en fait : si la formation des effectifs n'avait dans les résultats précédemment développés que peu d'impact sur la qualité des travaux, on voit ici en revanche qu'elle est de force à résorber considérablement les coûts associés à la non-qualité par le modèle : entre 8% (LOD 5) et 12% (LOD 1) de surcoûts sur $ope.costs(t)$ ont été mesurés dans un cas de non-formation des effectifs. Le LOD 3 est ici la configuration qui permet les dépenses les moins importantes sur la période considérée.

On souhaite à présent mettre ces coûts en regard des volumes horaires consommés par l'organisation pour la mise en œuvre de sa stratégie numérique. La Figure 89 en page suivante présente les résultats obtenus dans MACARON : comme pour les volumes financiers, on cherche à caractériser les

volumes de temps dédiés aux missions R seules, puis aux missions R+MR de sorte à mesurer l'ampleur de la surconsommation de ressources humaines impliquées par l'adoption du BIM.

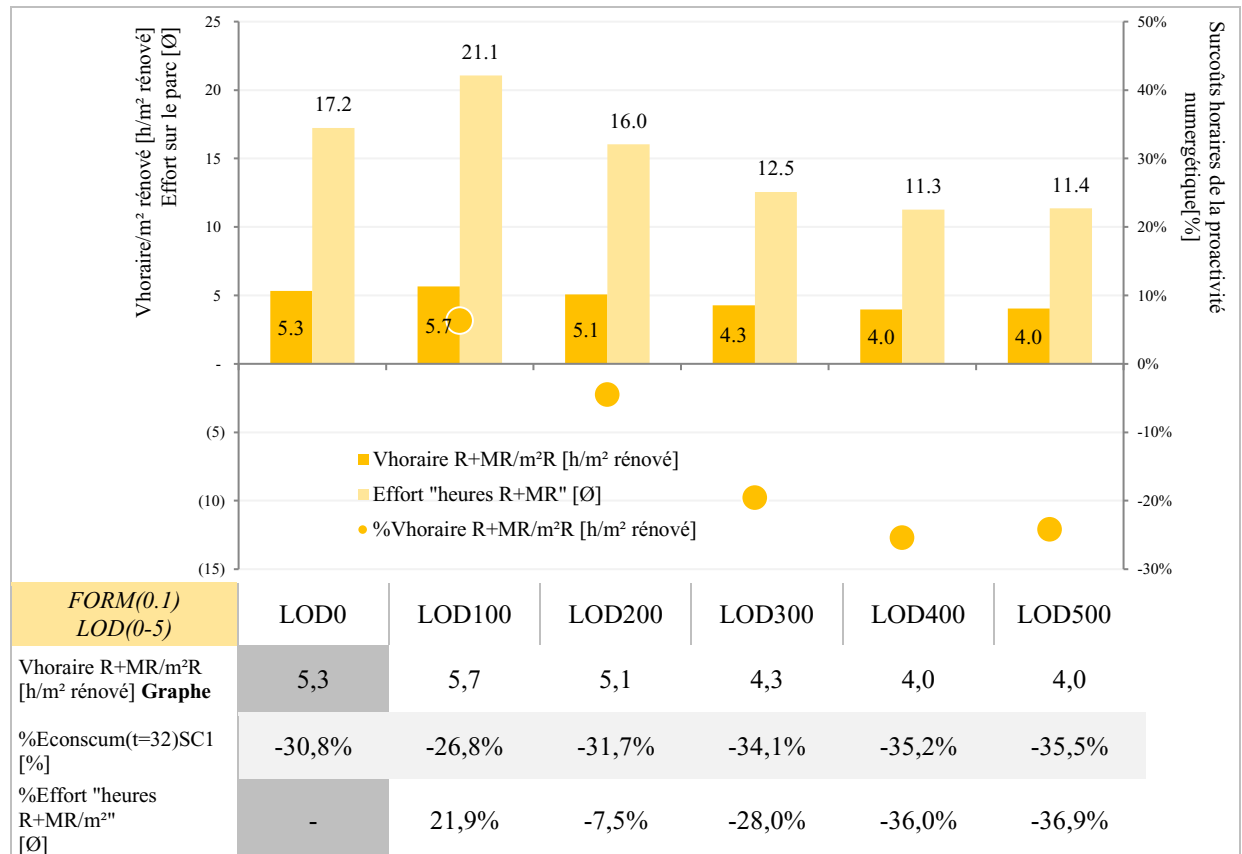


Figure 89. Consommation de ressources humaines pour les opérations numergétiques : sensibilité à FORM-LOD.

En SC1, notre cas de référence ici, l'organisation dépensait 5,3 heures par m² renové sur le parc, pour les missions de rénovation seules. Ici le BIM, dans les configurations LOD 2 à LOD 5, présente une moindre consommation des ressources humaines (histogrammes jaune foncé) même en considérant les missions R+MR. Ramenées aux économies d'énergie générées sur le parc sur la période considérée, on mesure comme en SC1 l'effort consenti par le gestionnaire dans sa stratégie numergétique (histogrammes jaune clair). Alors que les LOD 3 et 4 par exemple présentaient la même performance en termes de volumes horaires par unité de surface (4,0 heures/m² renové), l'effort nous permet de les différencier en fonction de la performance énergétique qu'ils autorisent : on évalue ainsi la pertinence de l'investissement humain fourni par l'organisation, lequel une fois encore se justifie parfaitement à la comparaison de SC1 et SC2. Les LOD 3 et 4 représentent un effort sensiblement identique, toutefois on identifie ici encore le LOD 4 comme étant le plus performant, cette fois sur le plan humain. Comme précédemment le LOD 1 se détache des autres LOD et provoque une surconsommation de temps par rapport à la situation de référence : il reste défavorable à l'atteinte des objectifs de rationalisation des ressources poursuivis par la stratégie numergétique du gestionnaire.

3.2.5. Non-qualité

Pour rappel le ratio des euros et heures de non-qualité, au prorata des coûts et volumes horaires initialement prévus pour les travaux, donne l'indice de qualité des rénovations. Plus la non-qualité est présente dans les processus opérationnels (voir chapitre 4, MIRH et MIDN) de l'organisation, plus la performance des rénovations et celle du parc sont affectées. Comme en SC1, on représente les résultats obtenus par MACARON lorsque la prise en compte de la non-qualité est activée/désactivée dans le modèle (Figure 90 page suivante), pour les coûts et les volumes horaires de rénovation par unité de surface.

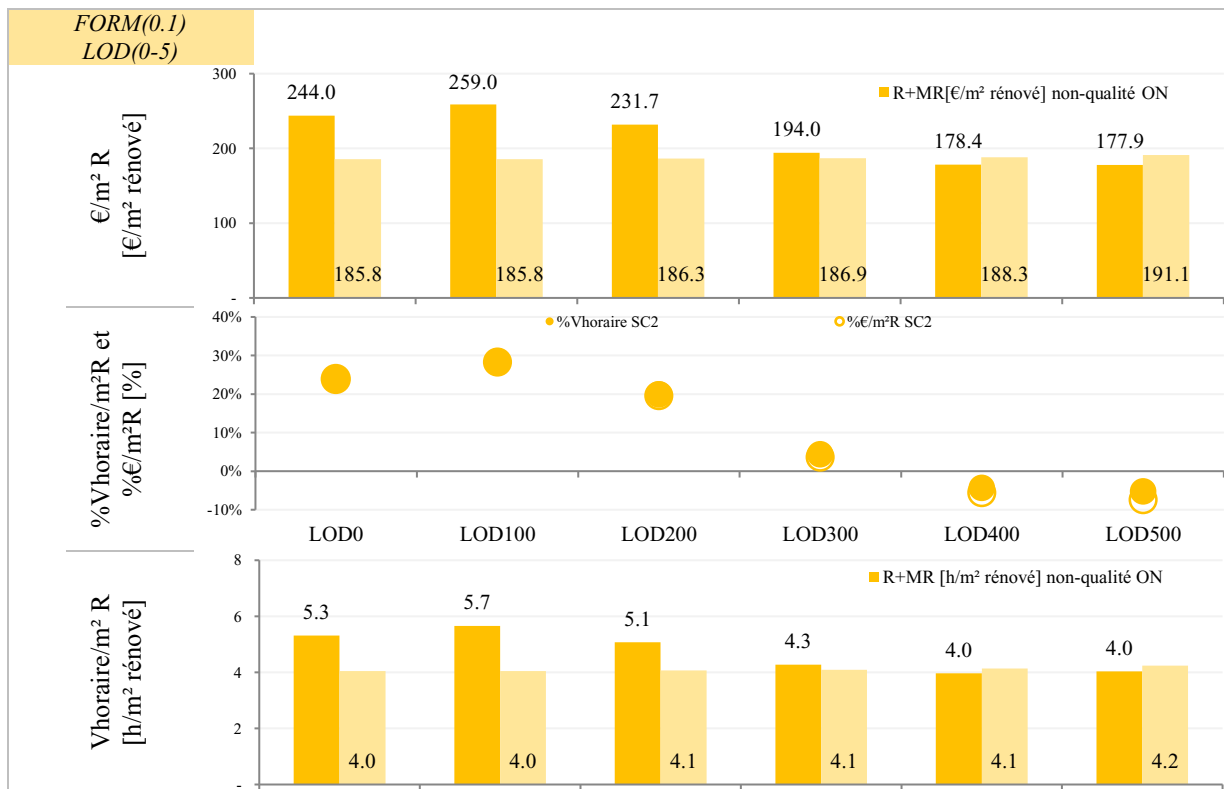


Figure 90. Impact de la non-qualité sur les volumes financiers et horaires investis par l'organisation : sensibilité à LOD.

On s'aperçoit que les ratios de non-qualité mesurés pour les volumes financiers et pour les volumes horaires sont similaires pour un LOD donné. On observe qu'en LOD 4 et 5 le BIM permet de résorber complètement la non-qualité, voire d'améliorer les processus internes plus que nous n'aurions pu l'imaginer puisque les efforts financiers et humains fournis dans ces configurations sont inférieurs à ceux demandés en situation « normale », sans prise en compte de la non-qualité. Avec le BIM, plus le LOD est faible plus le modèle est sensible à la non-qualité. Cela se traduit ici par une surconsommation de ressources humaines et financières comprise entre 20% et 30% pour les LOD 1, 2 et 0 (sans BIM, SC1). Le LOD 5 est ici la configuration la plus favorable pour le gestionnaire, mais les LOD 3 et 4 présentent eux aussi des caractéristiques très intéressantes.

3.3. Synthèse SC2 : choix d'une stratégie numérique

L'impact des formations est rapidement dissout dans le modèle : hormis sous l'aspect financier, les formations ont un impact négligeable sur la qualité résultante des modèles de données et des rénovations. On conservera dans les scénarios suivants la configuration FORM 1 : cela permet de maintenir dans le modèle un niveau de contrainte financière réaliste. De plus cette configuration semble générer des dynamiques complexes de plus et moins-values à travers les processus opérationnels ce qui aboutit dans le présent scénario à un certain nombre de résultats contrintuitifs intéressants. Notre analyse de la qualité et des volumes horaires et financiers mobilisés par la rénovation seule, puis par la rénovation BIM-centrée montre qu'il n'existe pas de configuration de LOD favorable sur tous les trois plans humain, énergétique et financier.

On note malgré tout que, hormis en LOD 1, configuration presque toujours défavorable comparée à une situation sans BIM, tous les LOD présentent des externalités positives, c'est typiquement le cas de la performance énergétique laquelle est d'autant meilleure que le LOD est élevé. On mesure en outre une meilleure utilisation du temps de travail et des investissements dans les LOD forts.

Étonnamment le modèle révèle un impact économique du BIM plutôt neutre quel que soit le niveau de numérisation choisi par le décideur : les surcoûts attendus provenant des investissements BIM et des coûts d'exploitation additionnels semblent être en grande partie compensés par une forte diminution des dépenses courantes de maintenance et de fonctionnement. Ainsi le BIM, au contraire de contraindre davantage la capacité financière de l'organisation, la maintient. Que ce soit en termes de qualité des rénovations et de la gestion de données ou d'économies d'énergie réalisées, le LOD 5

constitue la situation la plus favorable pour le gestionnaire, ce qui est pertinent au vu de nos hypothèses de modélisation lesquelles lui confèrent le meilleur taux d'adéquation aux activités de gestion de patrimoine. Toutefois un examen minutieux des résultats obtenus montre un écart de performance particulièrement faible avec les LOD 3 et 4 : on mesure notamment sur les performances énergétiques et humaines un écart absolu inférieur à 0,5% et 1% respectivement entre les LOD 4 et 5, et entre les LOD 3 et 5 sur la plupart des variables évaluées.

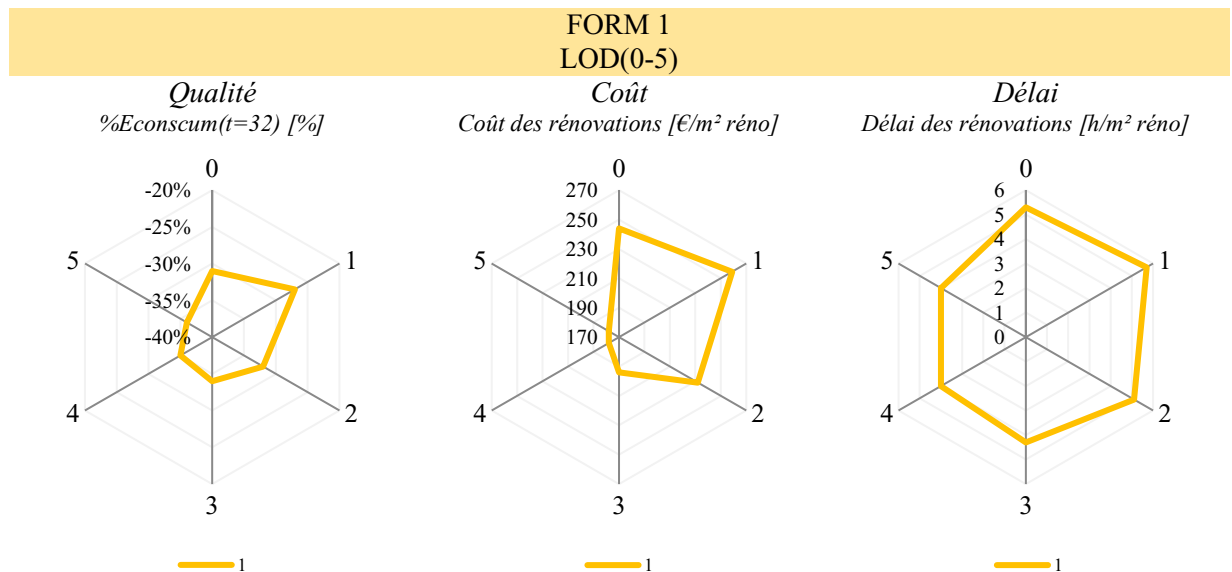


Figure 91. Synthèse FORM-LOD : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations.

Cette proximité des résultats pour les LOD 3, 4 et 5 ne se répercute pas en revanche à l'analyse de la capacité financière de l'organisation : en effet les LOD 3 et 4 sollicitent des dépenses moindres en termes d'investissements numériques et de coûts de fonctionnement, ce qui confère à cet endroit un léger avantage économique à ces LOD par rapport au LOD 5. Le LOD 2 est un cas intéressant : hormis en ce qui concerne les coûts-avantages associés au BIM, il possède toutes les caractéristiques d'une situation de type LOD 0. Dans le présent scénario le LOD 2, toutes choses égales par ailleurs, permet une amélioration limitée des performances globales de la situation sans BIM.

Toutefois, ces résultats sont valables dans une configuration particulière de l'environnement BIM : nous l'avons vu dans cette partie, la maturité technique et technologique du BIM est dans MACARON un facteur important de l'évolution de la compétence BIM à l'échelle organisationnelle. Dans quelle mesure les résultats obtenus ici sont-ils sensibles à l'évolution l'environnement BIM ? La date de déploiement du BIM, en conséquence, a-t-elle un impact significatif sur le bilan de performance du parc ? Si oui, celui-ci reste-t-il favorable au gestionnaire ? Nous répondrons à ces questions dans le scénario SC3 qui fait l'objet de la partie suivante. Dans la suite de ces travaux, on exclura le LOD 1 et le LOD 5 (LOD extrêmes) afin de concentrer notre attention sur les comportements moins prévisibles des LOD centraux (LOD 2, 3 et 4) de sorte que notre scénario de référence s'écrit :

SC

PP

VV1

VL

RT

MIX

FORM

LOD

CODE :

2

-

E

1

Y

-

5

I

-

1

(0.2.3.4)

2-E IX-5I-1(0.2.3.4) - Sensibilité

SC 2	REFERENCE				ENERGIE			NUMERIQUE							RESS. HUMAINES		ECONOMIE										
	E	VL			I	MIX		LOD							MAT		VV'										
		X	Y	N		I	E		R	0	1	2	3	4	5	1		2	M	N	P						
VV	0				RT			FORM	1	0						T0	5	2	0	DER	2	1					
	1																										
	4																										
	5																										

• Computed configuration

Initial conditions (not tested)

PP E : Social dwell

Figure 92. Tableau de synthèse SC2 : choix d'une stratégie numergétique.

4. Scénario SC3 : E1Y-5I-1(0234)-T0-MAT

4.1. Paramètres T0-MAT et causalités simplifiées

Dans ce scénario on observe la sensibilité des résultats obtenus en SC2 à la variation des caractéristiques de l'environnement numérique du système à savoir :

- La date de déploiement du BIM (T0),
- L'évolution de la maturité technologique du BIM (MAT).

Les temporalités caractéristiques du BIM ont-elle une incidence significative sur la performance des investissements numergétiques montrée dans la partie précédente ? Nous mettrons en lumière dans cette partie les effets conjoints de T0 et MAT, éléments respectivement considérés comme endogène (élément de décision) et exogène (élément d'environnement) dans ces travaux, sur la capacité de l'organisation à maintenir ou renforcer l'efficacité de sa stratégie numergétique. La Figure 93 et l'arbre des causalités en Figure 94 résument les configurations qui seront testées par le présent scénario SC3 et les causalités mises en jeu dans MACARON.

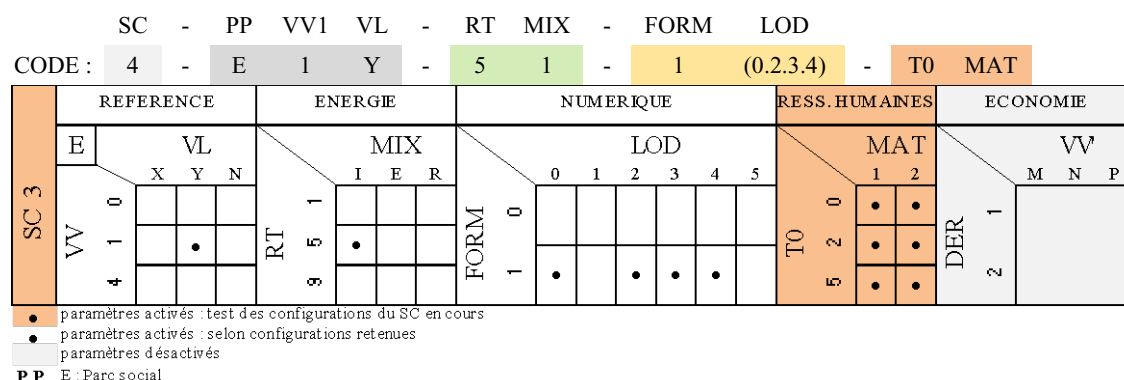


Figure 93. Analyses de sensibilité T0-MAT.

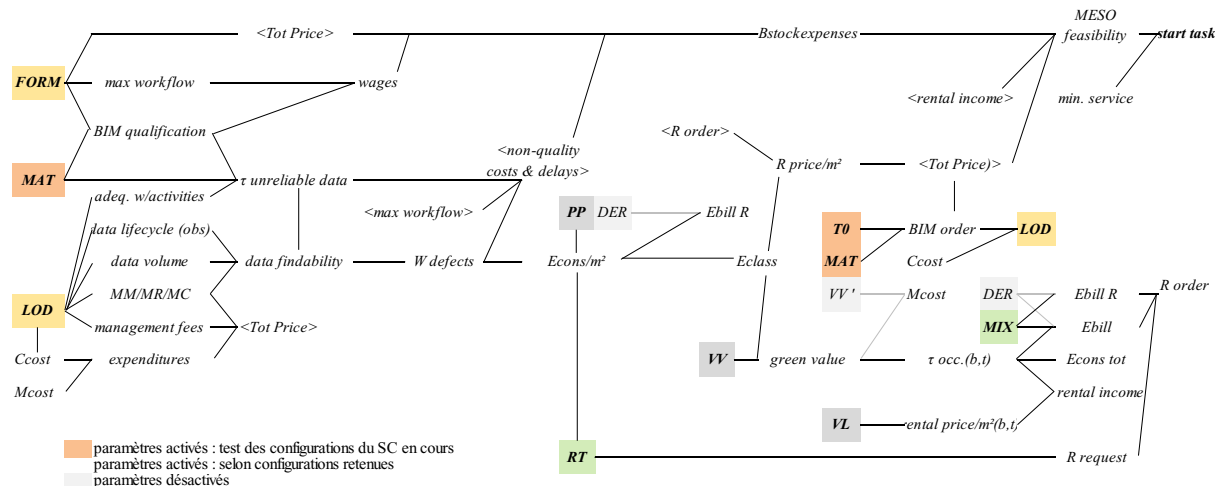


Figure 94. Arbre des causalités simplifié SC3.

La Table 62 en page suivante rappelle les caractéristiques des configurations retenues pour la modélisation dynamique de T0 et MAT dans MACARON. Ces éléments, nous l'avons introduit en SC2, ont un impact direct sur les dynamiques d'obsolescence de la compétence BIM. Ici notre modélisation repose sur l'hypothèse selon laquelle plus les outils numériques évoluent (vite), plus il est à la fois contraignant et essentiel d'être assidu dans la mise à jour des formations comme dans les activités de veille et d'actualisation. Sans cela nous soutenons ici que la connaissance de l'outil BIM accumulée à t n'est plus optimale à $t+1$, en raison par exemple du développement de nouvelles fonctionnalités lesquelles, si elle ne sont pas connues et maîtrisées par les effectifs BIM, peuvent générer de nouvelles dynamiques de non-interopérabilité aussi bien en interne qu'entre différents acteurs d'un même projet. En considérant les dynamiques de marché potentielles futures du BIM,

incertaines et sur lesquelles le gestionnaire n'a aucune emprise, MACARON privilégie l'analyse de la date de déploiement du BIM.

Table 62. Caractéristiques des paramètres T0 et MAT.

Date de déploiement du BIM (T0)		Maturité technique du BIM (MAT)	
0	t=1 (2019)	1	La pleine maturité technologique du BIM est atteinte à horizon T0+10 ans
2	t=5 (2022)		
5	BIM market maturity10(t) ≥ 50%	2	La pleine maturité technologique du BIM est atteinte à horizon T0+25 ans

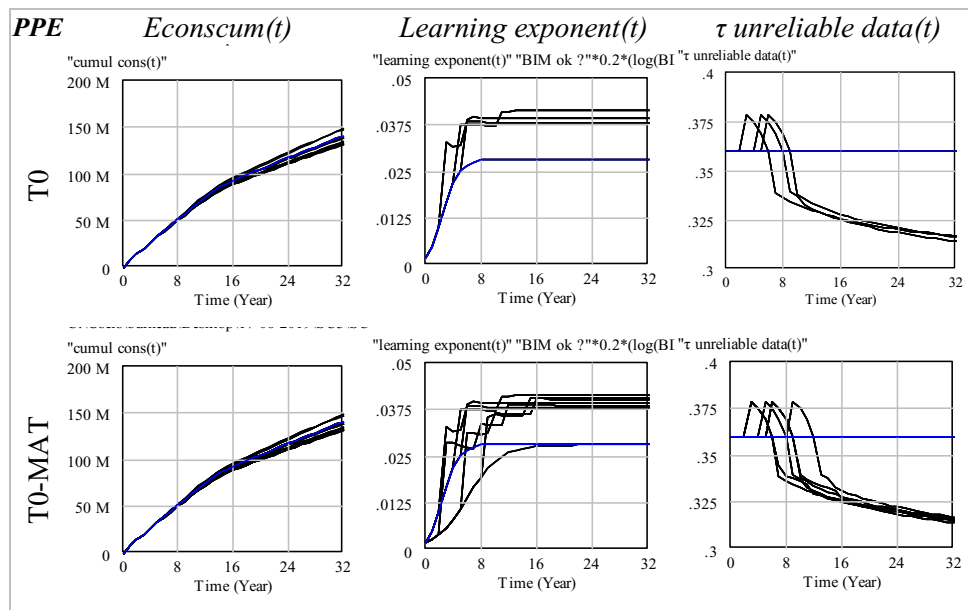


Figure 95. Tableau des impacts de T0 et MAT sur les consommations énergétiques (kWhep), le coefficient d'apprentissage de l'organisation et le taux de données non fiables.

Par rapport à une stratégie énergétique SC1 et aux conclusions qui ont été faites en SC2, certaines configurations permettent-elles d'améliorer encore la performance du parc et de l'organisation ? Existe-t-il un « bon moment », pour implanter le BIM, qui permette de maximiser les capacités de l'organisation, tout en limitant les investissements et/ou surcoûts BIM et les consommations d'énergie ? Nos objectifs de simulation pour l'analyse des résultats de SC3 sont présentés en Table 63.

Table 63. Rappel des objectifs de simulation de SC3.

Élément du trilemme	
Q	Gains TWh _{ep}
	Gains TWh _{cumac}
	Qualité des rénovations
	Qualité des flux de données
C	Qualification BIM
	Capacité financière
	Consommation des ressources financières
D	Non-qualité : Surcoût
	Consommation des ressources humaines

4.2. Analyse des résultats de SC3 : E1Y-5I-1(0234)-T0-MAT

4.2.1. Qualification BIM et qualité des rénovations

Nous avons montré en SC2 l'impact de la formation des effectifs et de la qualification BIM de l'organisation sur la qualité des flux opérationnels de gestion de données et de rénovation. Ici on considère la modification de la date de déploiement du BIM en interne comme vecteur potentiel de maximisation de la qualité des données et des travaux. On s'intéresse pour cela à l'évolution prévisible de la maturité de l'outil dont on suppose ici qu'elle a un impact fort sur les processus de gestion de données notamment à travers l'accroissement des fonctionnalités d'interopérabilité et de collaboration BIM. En Figure 96 ci-dessous on montre l'évolution produite par T0 et MAT sur les variables *BIM qualification(t)* le niveau de qualification BIM de l'organisation, et *Learning exponent(t)* la capacité d'apprentissage organisationnel.

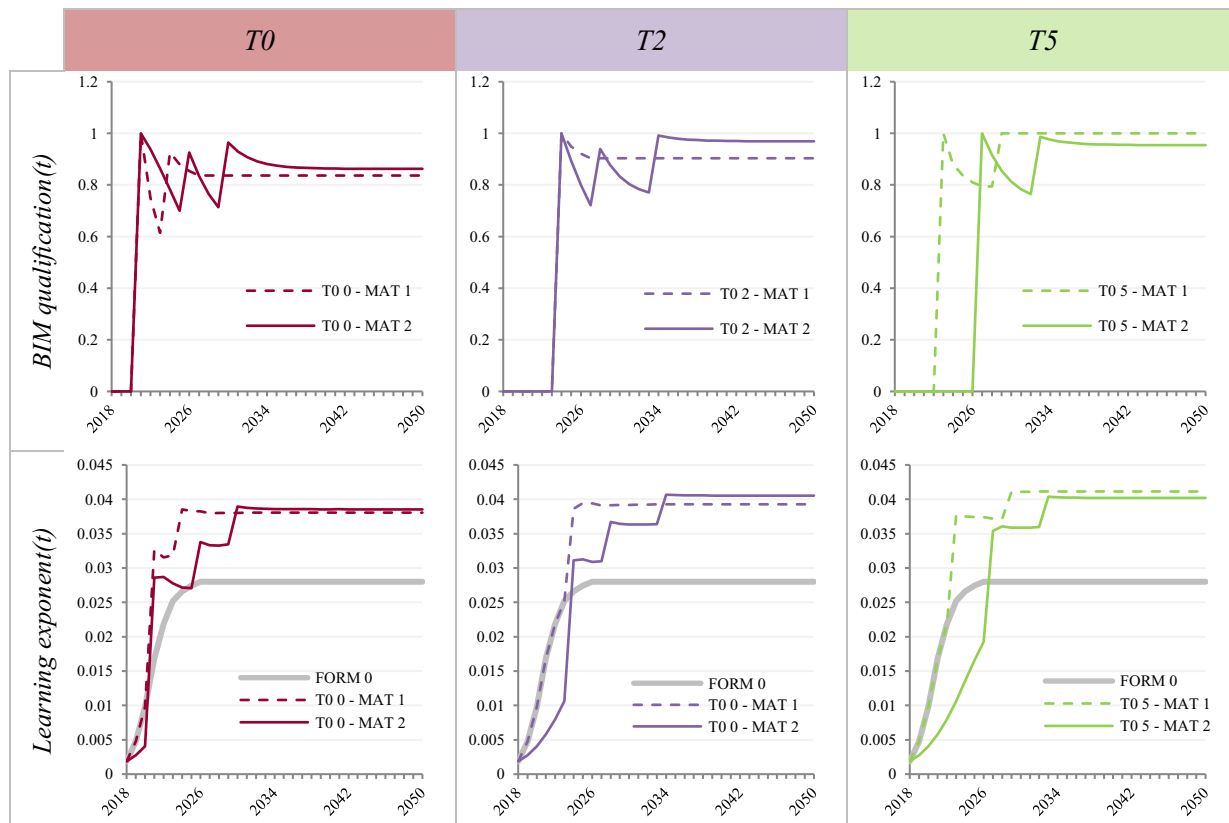


Figure 96. BIM qualification(t) et Learning exponent(t).

T0 est à l'origine d'un déphasage temporel, et MAT d'une variation d'amplitude.

Hormis en T5, on observe que MAT a un impact significatif sur le nombre de cycles de formation réalisés par les effectifs : un cycle de différence entre MAT1 et MAT2 en T0 ; deux cycles en T2, configuration dans laquelle MAT1 est le plus favorable de toutes avec un seul cycle de formation.

En MAT 2, un cycle de formation de différence entre T0,2 (trois cycles) et T5 (deux cycles).

La stabilisation du niveau de qualification apparaît avec plus ou moins de décalage temporel entre MAT1 et MAT2 selon la date de déploiement considérée (dans l'ordre du plus petit déphasage au plus grand : T5, T0, T2). T0 dans les deux configurations de MAT permet à l'organisation d'acquérir très rapidement un bon niveau de qualification BIM, qu'il met en revanche plus de temps à stabiliser.

Les écarts obtenus entre les niveaux de qualification générés MAT1 et MAT2 sont eux aussi plus ou moins importants en fonction de T0. La configuration qui permet le meilleur niveau de qualification est T5-MAT1 qui se stabilise à une qualification de 1. Toutefois T2-MAT1 possède aussi des caractéristiques intéressantes avec une stabilisation très rapide à environ 0,9 avec seulement un cycle de formation des effectifs. T0 semble être au regard de ces considérations la configuration la moins performante.

Les mêmes constats peuvent être faits en ce qui concerne le coefficient d'apprentissage de l'organisation : ici aussi, il semblerait qu'il faille faire un choix entre atteindre plus vite un niveau acceptable (courbes MAT1 se détachent plus ou moins tôt de FORM0 selon T0) ou mettre plus de temps à atteindre de meilleures performances. Cela dit, la différence d'amplitude du coefficient d'apprentissage stabilisé entre les différentes configurations de T0-MAT est de l'ordre de quelques millièmes, ce qui questionne d'autant plus l'impact cumulé sur le long-terme de l'évolution du coefficient d'apprentissage sur les performances globales de l'organisation.

MAT2 génère des différences d'amplitude particulièrement importantes en T2 et T5. Rappelons que la qualification BIM et le coefficient d'apprentissage possèdent un lien causal fort dans MACARON avec les processus internes du gestionnaire en matière de gestion de données. Aussi peut-on les mettre en regard de l'évolution de $\tau_{unreliable\ data}(t)$ et de $\tau_{unprod.\ time}(t)[\%]$, respectivement le taux d'erreurs/heure travaillée à l'origine des flux de non-qualité et le ratio de temps improductifs par nature présentés en Figure 97.

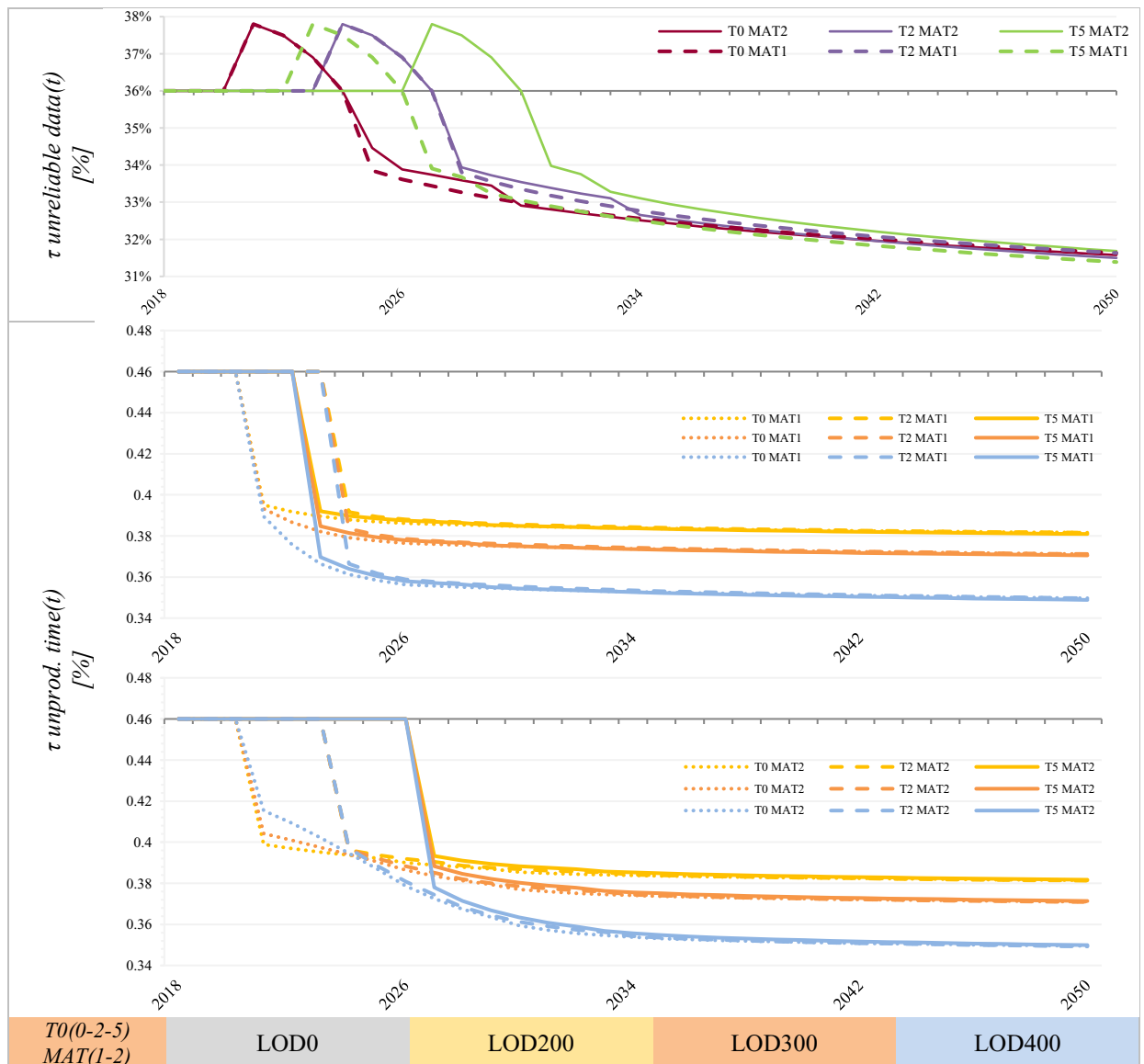


Figure 97. Qualité des flux de gestion de données, trouvabilité de l'information et impact sur la qualité des travaux : sensibilité à T0-MAT.

Comme en SC2 le BIM permet une nette diminution du taux de non-qualité dans les processus de gestion de données $\tau_{unreliable\ data}(t)$, néanmoins cet élément ne subit pas de variation majeure dans ses dynamiques d'évolution quelle que soit la configuration de T0-MAT : on ne note aucune variation d'amplitude significative. En particulier l'effet « négatif » de l'implémentation du BIM (augmentation du taux d'erreurs dans les premières années d'utilisation) est le même dans tous les cas présentés. Toutes les configurations convergent par ailleurs vers la même valeur de 31,5% à horizon de

simulation. Ainsi seule la date de déploiement peut provoquer ici un effet sur la qualité globale des processus mesurée à moyen-terme. Cet effet est pressenti ici d'autant plus positif que le BIM est mis en place tôt.

Même constat pour le ratio de temps improductifs $\tau_{unprod. time(t)}[\%]$ sauf que celui-ci est sensible au LOD. Plus le LOD est fort et plus la capacité d'apprentissage de l'organisation est élevée, plus le gestionnaire est en mesure d'améliorer la qualité de ses flux de gestion de données. Toutefois l'effet de MAT, ainsi que les impacts conjoints de la qualification et de l'apprentissage, deviennent quasi-nuls à l'analyse des indices de qualité des modèles de données $qDM(t)$ et de trouvabilité des données $data\ findability(t)$ (Figure 98 ci-dessous). Ici seuls T0 et LOD (dans une moindre mesure concernant $qDM(t)$) affectent visiblement ces éléments.

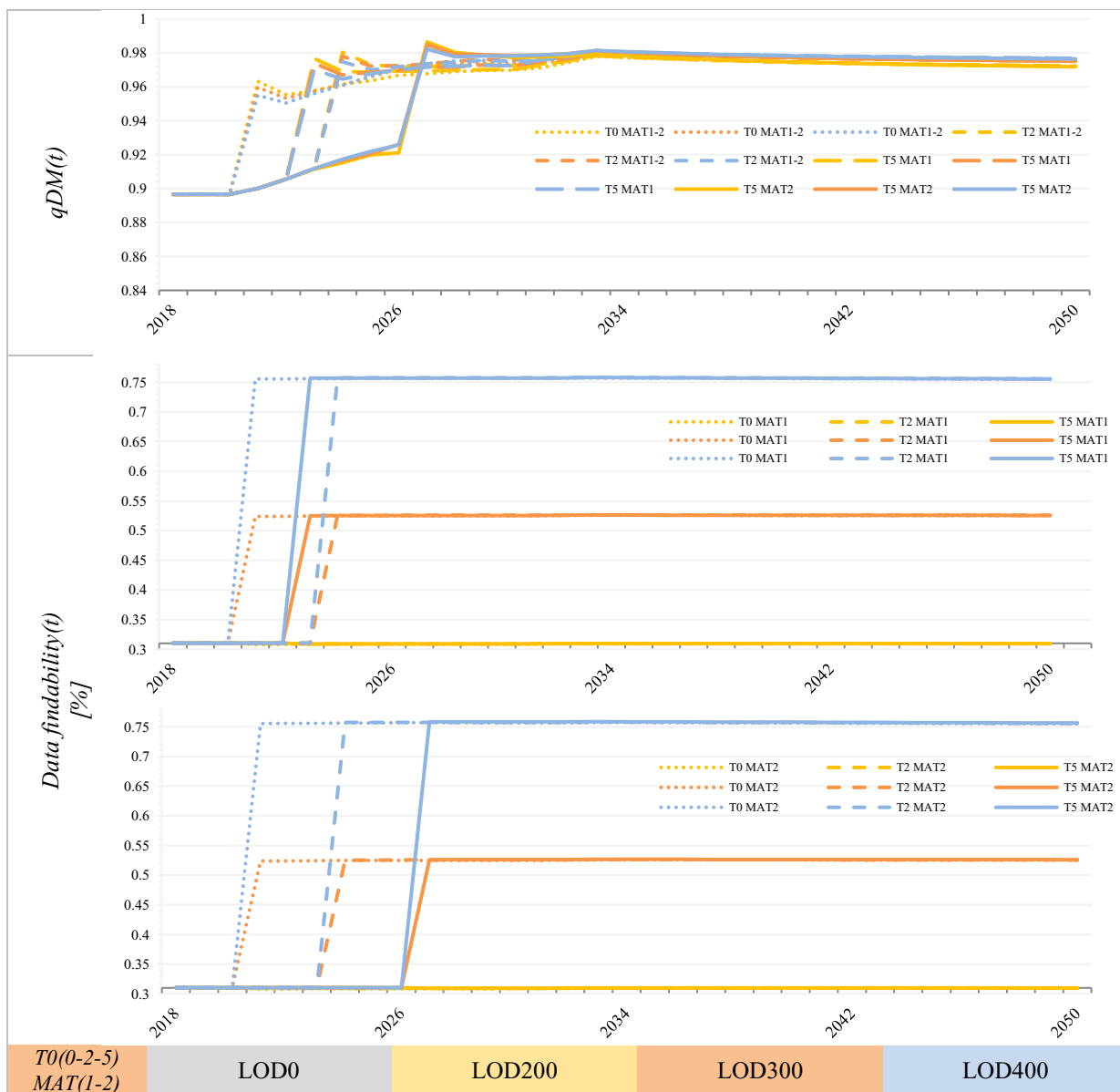


Figure 98. Qualité des flux de gestion de données, trouvabilité de l'information et impact sur la qualité des travaux : sensibilité à T0-MAT.

La Figure 99 ci-dessous présente l'évolution de la qualité des rénovations $qR(t)$ au cours du temps.

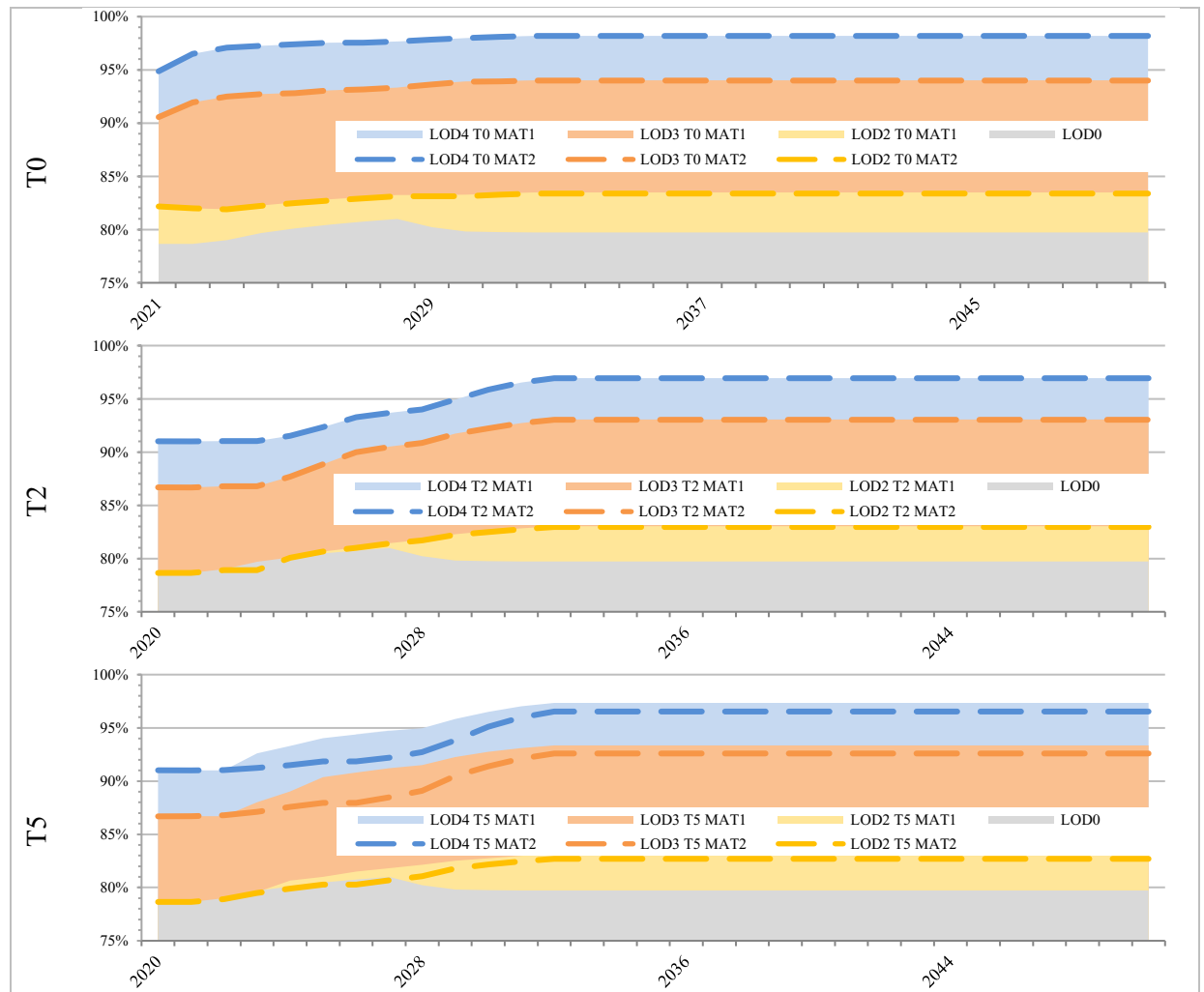


Figure 99. Évolution de $qR(t)$ l'indice de qualité des rénovations : sensibilité à T0-MAT.

La Figure 100 en page suivante met en évidence les dynamiques de variation $qR(t+1)-qR(t)$.

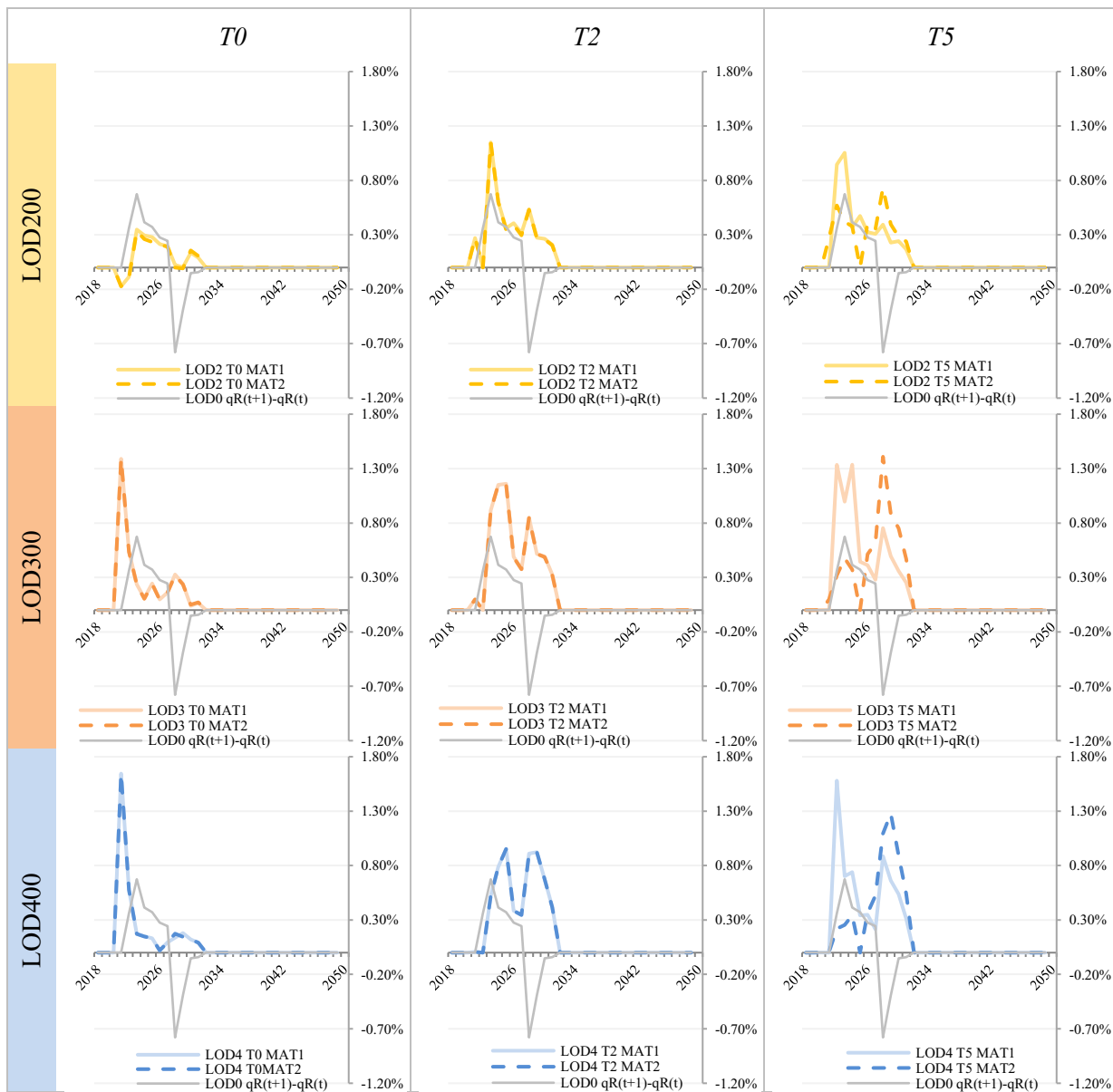


Figure 100. Variation de l'indice de qualité des rénovations $qR(t+1)-qR(t)$: sensibilité à T0-MAT.

En Figure 99 comme en Figure 100, l'impact de MAT sur la qualité des travaux pour une date donnée est quasi nul (seule la configuration T5 lie explicitement T0 et MAT en déterminant le premier en fonction de la valeur du second). En Figure 99, on note toujours un delta de qualité relativement important de plusieurs points entre les différents LOD. T0 présente l'indice de qualité le plus important, et permet une amélioration très rapide et stable dans le temps de la qualité des travaux. T2 et T5 sont très semblables, l'amélioration y est plus tardive et moins intense. En T5, MAT2 retarde l'amélioration de la qualité des travaux : l'impact de MAT2 semble d'autant plus important que le LOD est élevé.

En revanche les configurations présentent des comportements très différents en fonction de T0. Les LOD provoquent une variation d'ampleur mais on retrouve les mêmes dynamiques pour un T0 donné : un gain de qualité très fort en début de simulation pour T0, un gain de qualité en deux fois pour T2, une amélioration très tardive en T5-MAT2 (MAT1 ressemble à T2).

En T0 plus le LOD est fort plus le gain de qualité est important. C'est moins le cas sur les autres T0. La configuration T0-LOD400 semble être la plus prometteuse, mais on observe que le LOD300 offre un gain de performance plus stable et parmi les meilleurs quel que soit T0. Toutefois il est difficile de déterminer ici précisément laquelle de ces configurations est réellement la plus favorable au gestionnaire.

La section suivante analyse les gains de performance réalisés sur le parc.

4.2.2. Gains de performance énergétique

Les écarts relatifs aux scénarios précédents des gains de performance en TWhep et en TWhecumac sont présentés en Figure 101 ci-dessous.

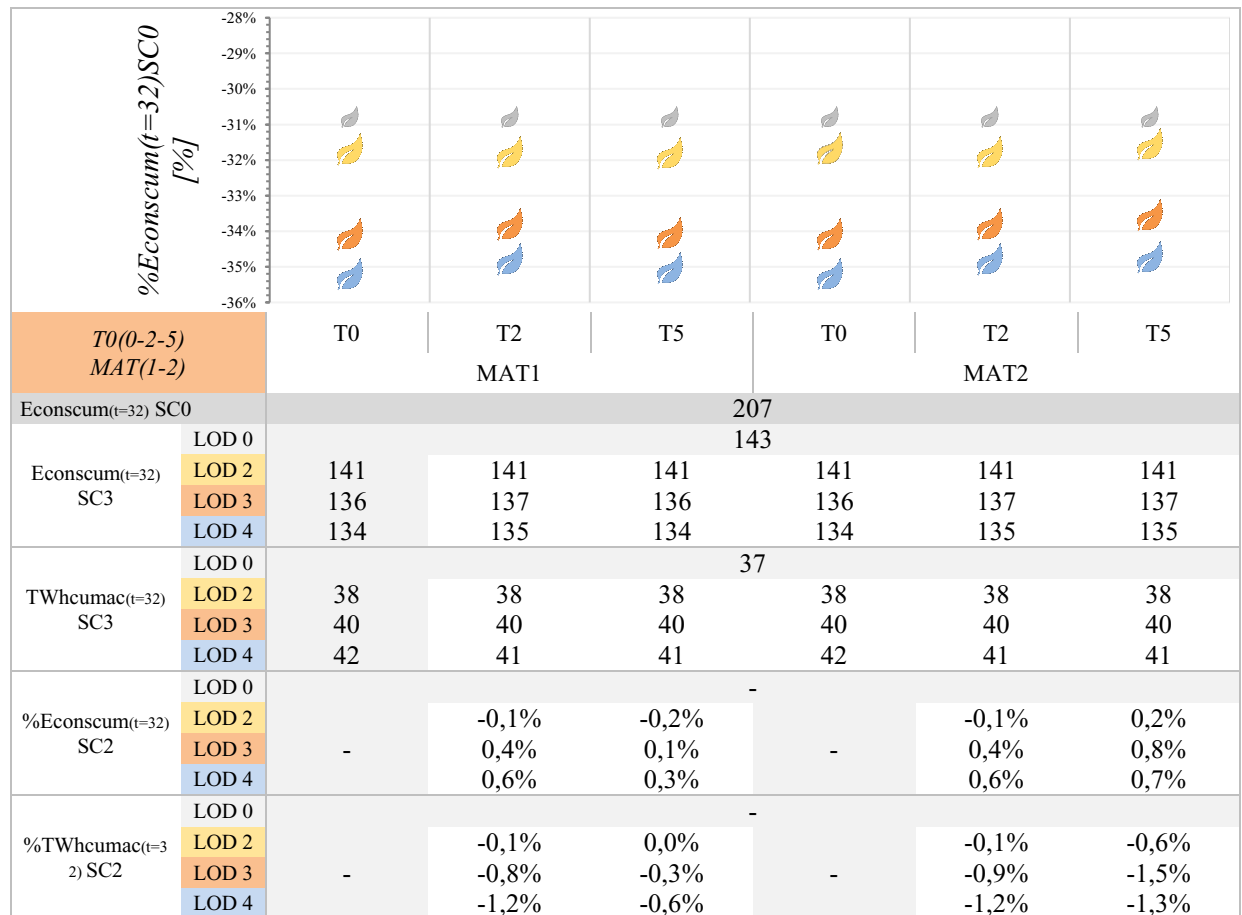


Figure 101. Ecart relatif à SC0 et SC2 des consommations cumulées en TWhep ; Ecart relatif à SC2 des gains TWhecumac(t=32) : sensibilité à T0-MAT.

Comme en SC2, plus le LOD est fort plus les gains sont importants, mais pas de variation notable des gains sur les consommations énergétiques par rapport aux résultats obtenus précédemment. On peut noter à toutes fins utiles qu'ici, la configuration T5-MAT2 regroupe les valeurs maximales de $\%Econscum(t=32) SC2$ et $\%TWhecumac(t=32) SC2$ en LOD 3.

On observe moins de 1% d'écart relatif sur les consommations cumulées du parc, et 1,5% max de gains supplémentaires en TWhecumac ce qui ne nous semble pas suffisant pour motiver le choix de l'une ou l'autre configuration de T0-MAT ici.

Si les seuls résultats obtenus pour la qualité et les consommations énergétiques n'y suffisent pas, on s'attend à ce que l'analyse des ressources humaines et financières nous permette de distinguer plus nettement les impacts du contexte de mise en œuvre du BIM sur la performance des investissements numergétiques.

4.2.3. Évolution de la capacité financière

Selon la même méthode qu'en SC1 et SC2, on analyse dans cette section l'impact de T0 et MAT sur la variation de la capacité financière de l'organisation mesurée en SC2. La Figure 102 ci-dessous présente les montants, en €/m²loué/an de capacité financière, dégagés par l'activité de gestion de patrimoine BIM-centrée dans les différentes configurations de T0-MAT. L'écart relatif à LOD0 s'appuie sur la valeur de la capacité financière de l'organisation calculée en SC2 pour ce LOD soit 2,87 €/m² loué/an.

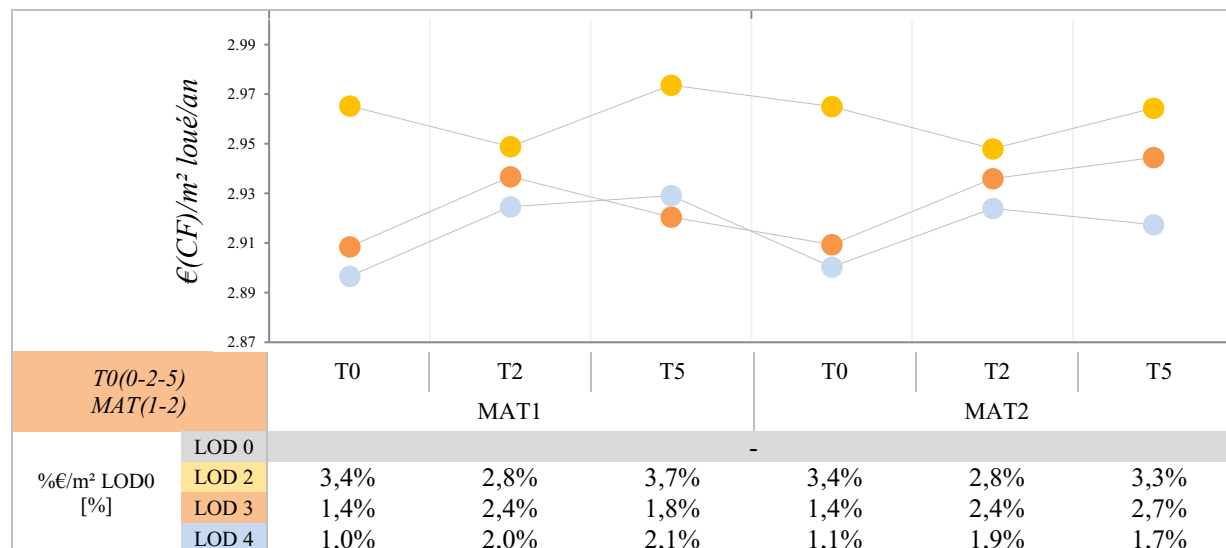


Figure 102. Capacité financière [€/m² loué/an]: sensibilité à T0-MAT.

Ici les résultats que nous avons déjà mis en évidence en SC2 se retrouvent. L'amélioration de la capacité financière du gestionnaire est d'autant plus importante que le LOD est faible. On observe une seule exception à cela en T5-MAT1, configuration dans laquelle le LOD 4 atteint une valeur plus élevée que le LOD 3. En revanche l'analyse est plus complexe sur T0 et MAT. Ici encore, il est difficile d'identifier un comportement précis, on remarque néanmoins que la configuration T5-MAT1, en LOD 2, offre la meilleure perspective d'amélioration de la capacité financière de l'organisation avec une augmentation relative de 3,7% de la capacité financière dégagée sans BIM.

4.2.4. Consommation de ressources internes : volumes financiers/horaires

La Table 64 ci-dessous présente le montant, pour chaque configuration, du coût moyen des rénovations sur la période considérée, en €/m² rénové. Ici la question est de savoir si les déphasages et les variations d'amplitudes provoquées par T0 et MAT à travers le modèle entraînent des dérives importantes des coûts de rénovation.

Table 64. Coût moyen des rénovations par unité de surface rénovée : sensibilité à T0-MAT.

<i>T0(0-2-5)</i> <i>MAT(1-2)</i>		MAT1		MAT2		MAT1		MAT2		MAT1		MAT2	
		T0				T2				T5			
Coût moyen des rénovations [€/m² réno]	LOD 0	244											
	LOD 2	233		237		233		233		237		245	
	LOD 3	195		217		207		195		217		229	
	LOD 4	181		203		198		182		209		204	

La configuration T5-MAT2 en LOD2 est la seule à provoquer une hausse du coût unitaire des rénovations par m² de surface par rapport à une situation sans BIM. Toutes les configurations sont par ailleurs défavorables en regard de la situation SC2 représentée par la configuration T0-MAT1.

MACARON permet également d'observer l'évolution des montants des investissements en rénovation et en numérisation, lesquels sont appréhendés non plus individuellement mais sous la forme d'investissements numergétiques additionnant les coûts des missions R et MR. La Figure 103 page suivante donne un aperçu de quelques résultats observables :

- l'écart relatif des montants investis pour la mise en œuvre du BIM et pour les opérations de rénovation en SC3, par rapport à la situation SC2 (équivalent T0-MAT1) $\%R\ INV\ [\%]\ T0\ MAT1$ (Fig.a) et $\%BIM\ INV\ [\%]\ T0\ MAT1$ (Fig.b).
- l'écart relatif de l'effort que représente la mission R+MR en SC3 par rapport à la mission R seule en SC1 $\%Effort\ R+MR\ SC1$ (Fig.c) et en SC2 $\%Effort\ R+MR\ SC2$ (Fig.f),
- l'écart relatif $\% \text{€}/\text{m}^2\ \text{rénové}\ T0\ MAT$ (Fig.d) du montant du coût des rénovations par unité de surface rénovée du parc⁷⁸ par rapport à la situation SC2 (équivalent T0-MAT1),
- l'écart relatif $\%V_{horaire\ tot}\ T0\ MAT$ (Fig.e) du volume horaire total que représente la mission R+MR en SC3, par rapport à la même mission en SC2 (équivalent T0-MAT1).

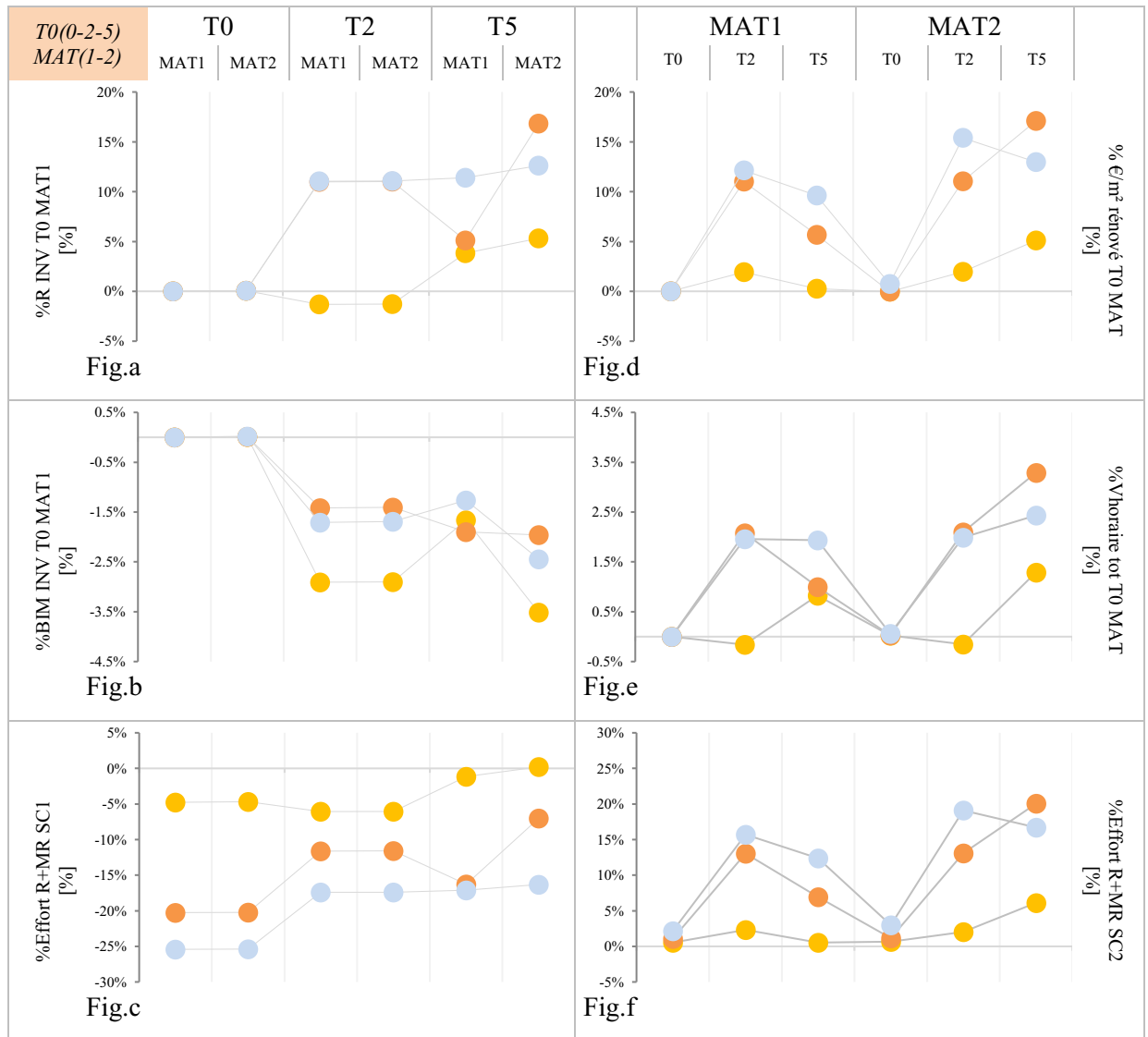


Figure 103. Consommation de ressources financières et humaines pour les investissements : sensibilité à T0-MAT.

⁷⁸ Coût moyen des rénovations calculé sur l'ensemble du parc et de la période de simulation, voir SC2.

La Figure 104 ci-dessous présente ensuite les variations constatées sur les montants des dépenses courantes d'exploitation $expenditures(t)$ et de fonctionnement $ope.costs(t)$. Si l'environnement BIM décrit par la date de déploiement et la maturité technologique du BIM a un impact que l'on considère négligeable sur les coûts d'exploitation (moins de 1% d'écart relatif à T0-MAT1, équivalent de SC2), les coûts de fonctionnement y sont eux beaucoup plus sensibles. Seuls les coûts de fonctionnement du LOD4 ne sont pas impactés par les différentes configurations de T0-MAT. En T2, les LOD2 et LOD3 présentent des surcoûts relatifs de 4 à 7% par rapport à la situation SC2. La configuration T5-MAT2 est de loin la plus défavorable pour ces LOD, avec respectivement 12% et 9% de surcoûts relatifs.

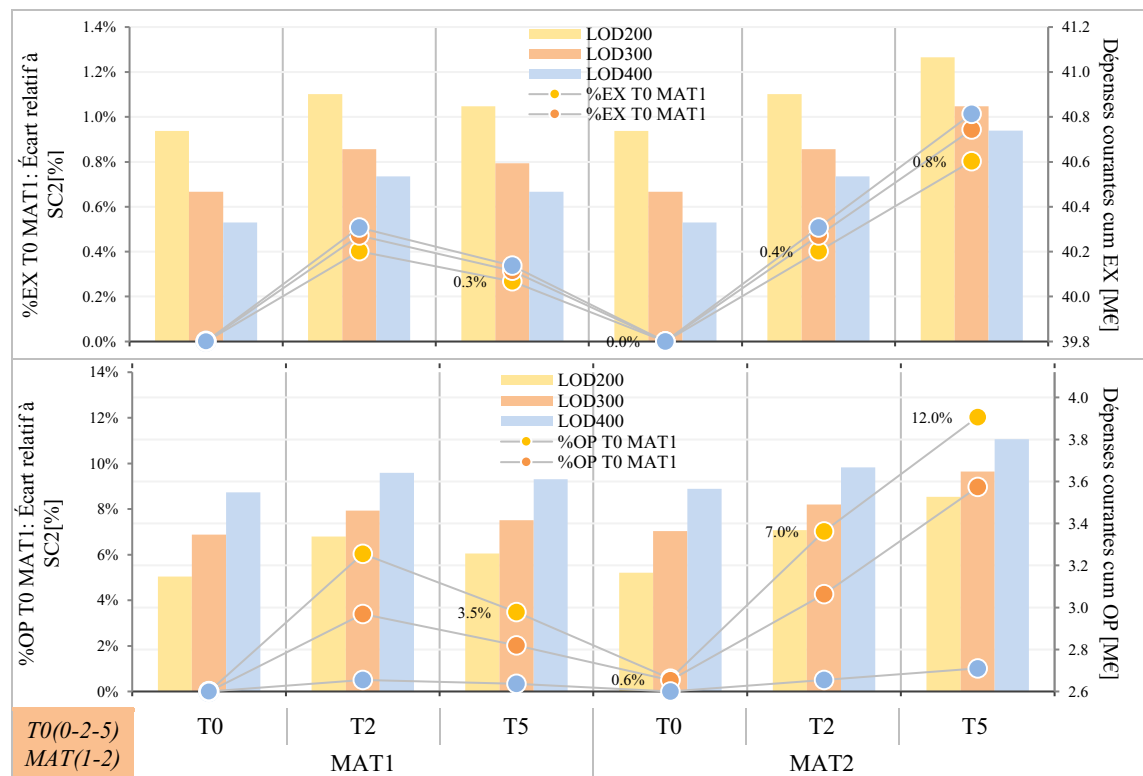


Figure 104. Consommation de ressources financières pour les dépenses courantes : sensibilité à T0-MAT.

4.2.5. Non-qualité

Comme en SC2, on représente les résultats obtenus par MACARON lorsque la prise en compte de la non-qualité est activée/désactivée dans le modèle (Figure 105), pour les coûts et les volumes horaires de rénovation par unité de surface. On replace sur le graphique les résultats du scénario précédent SC2 qui font office de référence et sont l'équivalent de la configuration T0-MAT1.

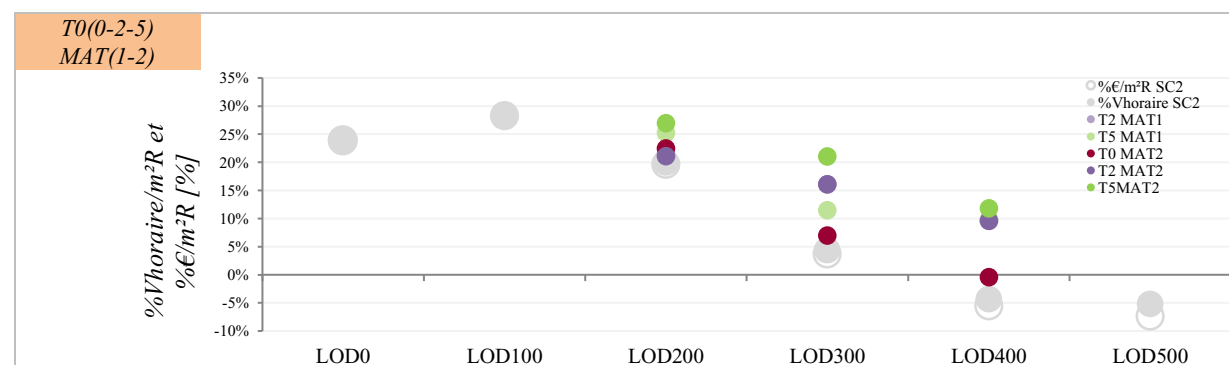


Figure 105. Impact de la non-qualité sur les volumes financiers et horaires investis par l'organisation : sensibilité à T0-MAT.

Quelle que soit la configuration considérée ici, et pour tous les LOD observés en SC3, la non-qualité est plus importantes dans les flux opérationnels et financiers que dans la situation de référence SC2. L'écart est maximal en T5-MAT2, situation la plus défavorable ici.

4.3. Synthèse SC3 : choix d'un contexte numérique

Le scénario SC3 valide notre hypothèse selon laquelle il existe un impact non négligeable de la conjonction de T0 et MAT dans les dynamiques de qualité révélées sur le parc. Impact significatif en gestion de données, lequel ne se répercute pas ensuite sur la qualité ni des modèles ni des rénovations. Ceci confirme l'intérêt réel de considérer la date de déploiement du BIM comme un élément de la prise de décision, en particulier dans un contexte aussi incertain que celui du développement de l'innovation. En tous cas sur des aspects ressources car l'impact sur la performance énergétique est nul ici. La qualité du parc, pour un LOD donné, semble insensible à l'environnement BIM : à l'échelle du parc et sur la période considérée, les variations de la performance énergétique globale sont négligeables. Comparé à une situation sans BIM en SC1, tous les T0-MAT diminuent l'effort global à générer sur le parc. En revanche comparé à SC2 avec le BIM, la proactivité est à favoriser ; les autres T2 et T5 génèrent un effort supplémentaire du gestionnaire. T5-MAT2, configuration la plus tardive, est aussi souvent la plus défavorable.

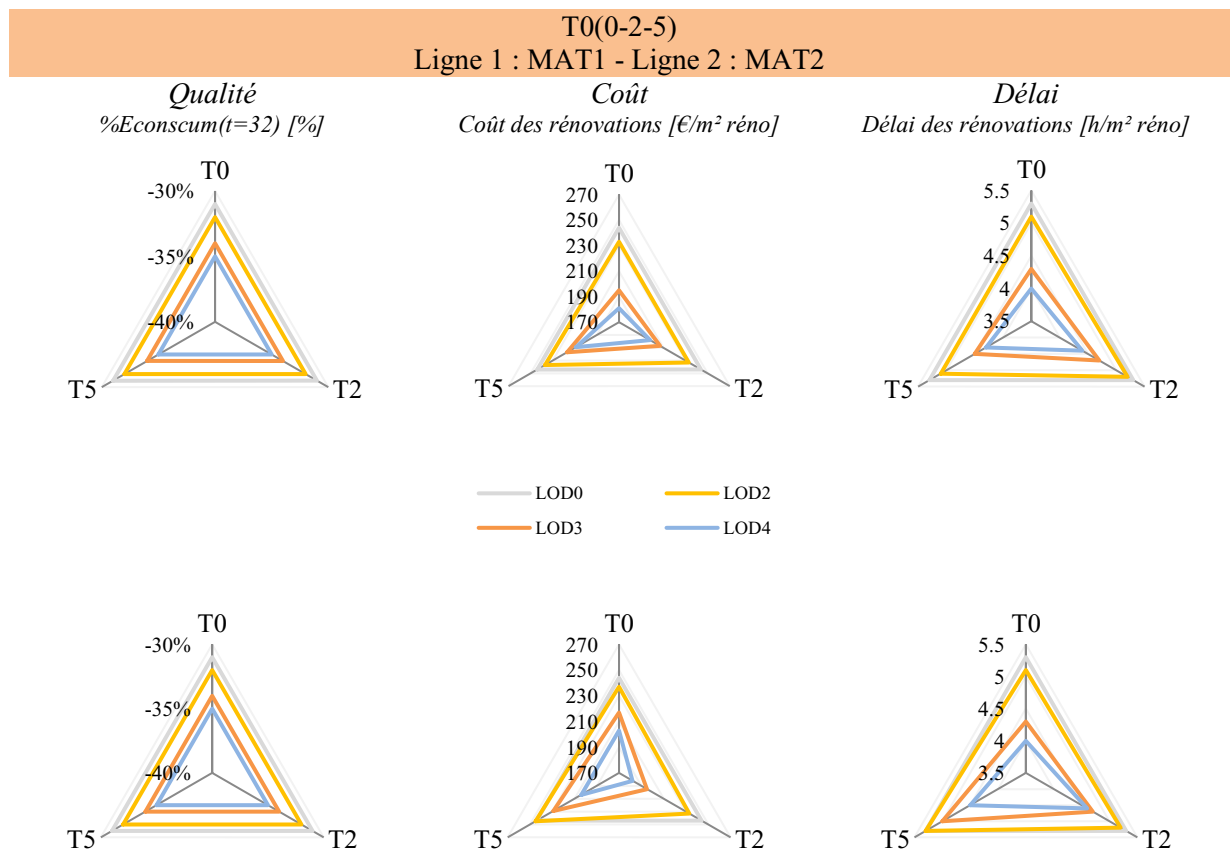


Figure 106. Synthèse T0-MAT : Résorption des consommations kWh, Coût/Délai des rénovations.

On retient pour la suite de l'étude un scénario de référence tel que :

		SC	-	PP	VV1	VL	-	RT	MIX	-	FORM	LOD	-	T0	MAT			
CODE :		4	-	E	1	Y	-	5	1	-	1	(0.2.3.4)	-	2	1			
SC 4	REFERENCE				ENERGIE			NUMERIQUE					RESS. HUMAINES		ECONOMIE			
	VV	E	VL			MIX			LOD					MAT		VV'		
		X	Y	N														
		0				I	E	R	0	1	2	3	4	5	1			2
		1																
4																		
0																		

5. Scénario SC4 : E1Y-5I-1(0234)-21-DER-VV'

5.1. Paramètres DER-VV' et causalités simplifiées

Dans cette section on observe la sensibilité du modèle à la variation des caractéristiques de l'environnement énergétique du système à savoir :

- des dynamiques d'évolution du prix des énergies (DER), d'une part ;
- de l'impact financier engendré par la rénovation du parc sur les coûts de maintenance en exploitation (VV').

La Figure 108 et l'arbre des causalités en Figure 109 résument les configurations qui seront testées par le présent scénario SC4 et les causalités mises en jeu dans MACARON.

		SC		-	PP	VV1		VL	-	RT	MIX		-	FORM	LOD		-	T0	MAT								
CODE :		4	-	E	1	Y	-	5	1	-	1	(0.2.3.4)		-	2	1	-	DER	VV'								
SC 4	REFERENCE				ENERGIE				NUMERIQUE						RESS. HUMAINES			ECONOMIE									
	VV	E	VL			RT	MIX			FORM	LOD						T0	MAT		DER	VV'						
			X	Y	N			I	E		R		0	1	2	3		4	5			1	2		M	N	P
		4	1	0																							

- paramètres actifs : test des configurations du SC en cours
- paramètres actifs : selon configurations retenues
- paramètres désactivés

PP : Parc social

Figure 108. Analyses de sensibilité DER-VV'.

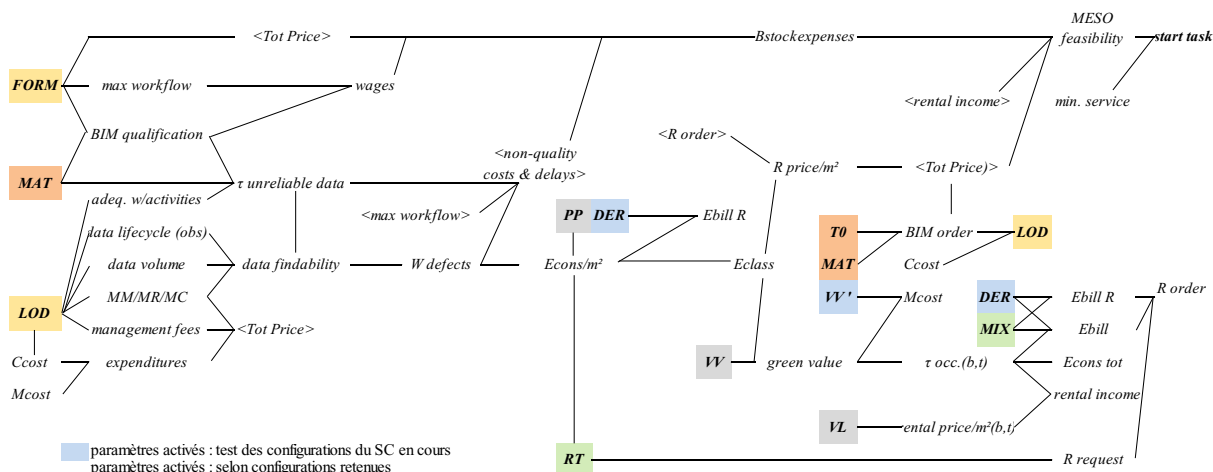


Figure 109. Arbre des causalités simplifié SC4.

La Table 65 en page suivante rappelle les caractéristiques des configurations retenues pour la modélisation dynamique de DER et VV' dans MACARON. On peut d'ores et déjà admettre que l'impact de ces paramètres concernera principalement le coût global des stratégies numergétiques envisagées, à travers la variation des coûts de maintenance et la priorisation des opérations de rénovation qui découle du montant de la facture énergétique des bâtiments.

Table 65. Caractéristiques des paramètres DER et VV'.

Dérive du prix de l'énergie (DER)		Valeur Verte' (VV')
1	Le prix en [€/kWh] d'énergie fossile augmente de 1% chaque année (eqX p.x)	0
	Le prix en [€/kWh] d'énergie verte diminue de 1% chaque année (eqX p.x)	
2	Le prix en [€/kWh] d'énergie fossile augmente de 1% chaque année jusqu'en 2022, date à partir de laquelle il augmente de 2% chaque année (eqX p.x)	1
	Le prix en [€/kWh] d'énergie verte diminue de 1% chaque année (eqX p.x)	2

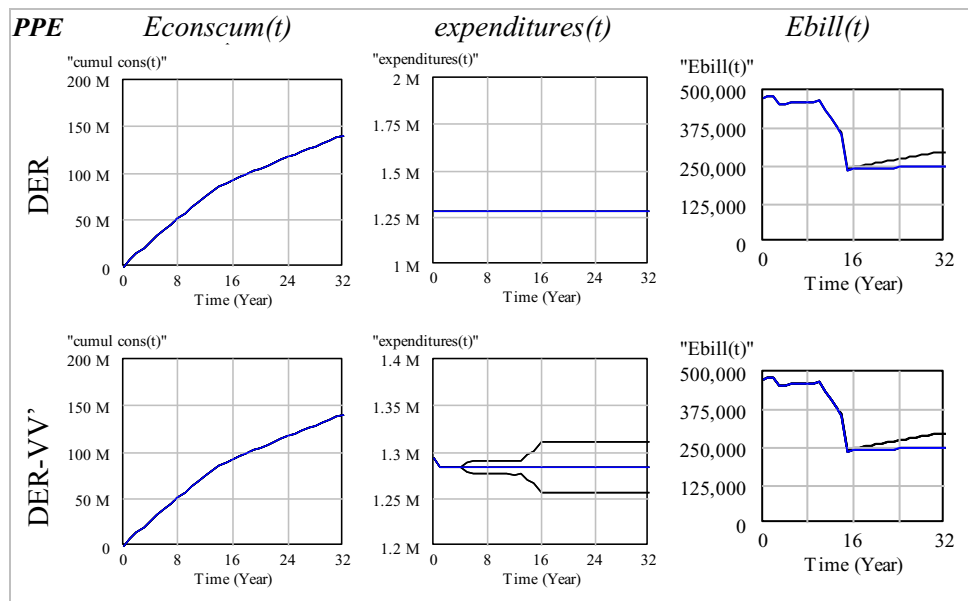


Figure 110. Tableau des impacts de DER et VV' sur les consommations énergétiques (kWh), les dépenses de maintenance et la facture énergétique annuelles.

Nos objectifs de simulation pour l'analyse des résultats de SC4 sont présentés en Table 66.

Table 66. Rappel des objectifs de simulation de SC4.

Éléments du trilemme QCD	
C	Capacité financière
	Consommation des ressources financières
	Coût d'un kWh cumac évité
	Temps de Retour Actualisé

5.2. Analyse des résultats de SC4 : E1Y-5I-1(0234)-21-DER-VV'

5.2.1. Évolution de la capacité financière et des coûts de rénovation

Selon la même méthode que précédemment, on analyse dans cette section l'impact de l'environnement énergétique sur la variation de la capacité financière de l'organisation mesurée en SC3. La Figure 111 ci-dessous présente les montants, en €/m²loué/an de capacité financière, dégagés par l'activité de gestion de patrimoine BIM-centrée dans les différentes configurations de DER-VV'.

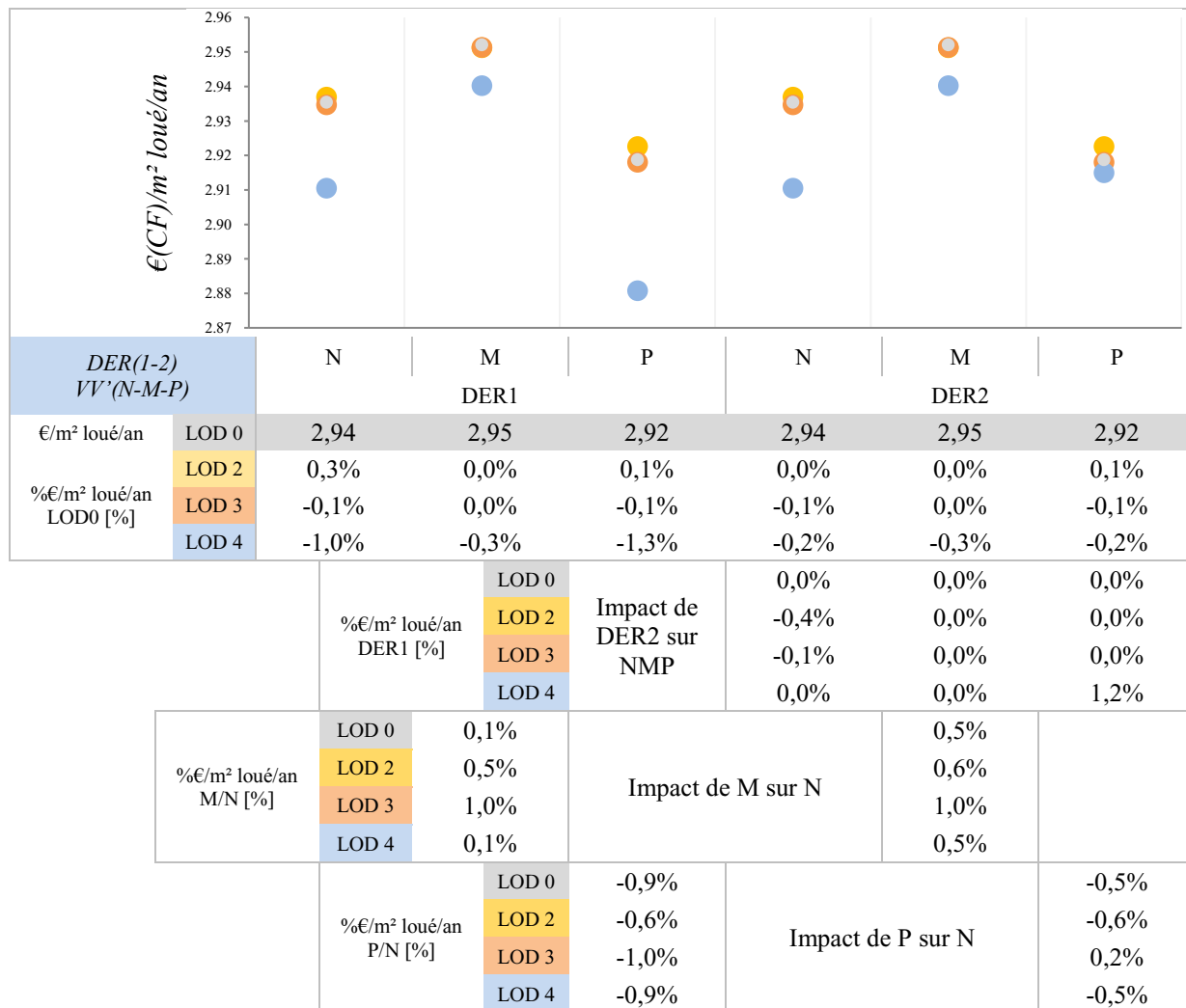


Figure 111. Capacité financière [€/m² loué/an]: sensibilité à DER-VV'.

Concernant la problématique BIM/non-BIM, seul le LOD4 génère une capacité financière moins importante que le LOD0. Toutefois l'écart relatif mesuré est de l'ordre du point ou moins. L'impact du LOD est ici négligeable. DER est également peu impactant ici : le gestionnaire n'ayant pas la charge de la facture énergétique, ceci est tout à fait plausible. En revanche l'impact des coûts d'entretien-maintenance est beaucoup moins important que ne le laissaient présager les résultats obtenus dans les scénarios précédents. Ces derniers montraient que les coûts d'exploitation *expenditures(t)* représentent la portion majoritaire des dépenses du parc. Aussi attendions-nous une sensibilité certaine du modèle à la variation de ces coûts. Comme cela avait été mis en évidence pour l'attractivité du parc, ici le modèle suggère que la valeur verte prise en compte dans ces travaux n'est pas de force à en modifier les dynamiques profondes.

Pour chacune des configurations DER1 et DER2, VV'M provoque l'augmentation de la capacité financière, et VV'P sa diminution (sauf en LOD3), ce qui est effectivement conforme à nos hypothèses de modélisation. En revanche les écarts relatifs à DER(1,2)-VV'N pour VV'M et VV'P, présentés en Figure 111 ci-avant sont, eux aussi, très limités.

L'impact mesuré sur les coûts de rénovation est en revanche plus important. La Figure 112 ci-dessous présente les résultats du coût moyen des rénovations calculé par MACARON sur la période de simulation pour chaque configuration de DER-VV', et les écarts relatifs à VV'N mesurés pour les configurations VV'M et VV'P de DER1 et DER2.

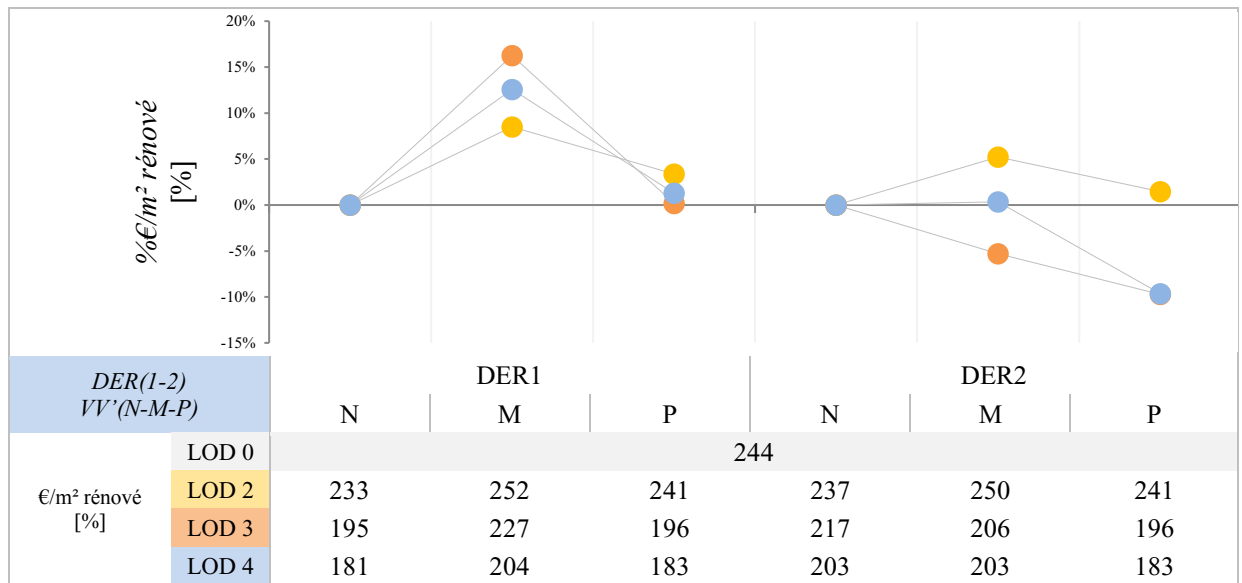


Figure 112. Coût moyen des rénovations [€/m² rénové] : sensibilité à DER-VV'.

Alors que la capacité financière augmentait en VV'M pour DER1 et DER2 par rapport à VV'N, ici on observe pourtant une augmentation des coûts de rénovation de l'ordre de 10 à 15% en DER1 selon le LOD étudié. En DER2 les LOD2, 3 et 4 génèrent respectivement l'augmentation, le maintien et la diminution des coûts de rénovation ce qui ne correspond pas non plus aux résultats précédemment obtenus sur la capacité financière. En VV'P le constat est sensiblement le même : l'augmentation des coûts en DER1 n'est pas proportionnelle à la diminution de la capacité financière mesurée ci-avant, et en DER2 les LOD3 et 4 provoquent même une diminution des coûts de rénovation laquelle n'explique pas les résultats mis en lumière ci-avant.

Ceci s'explique en partie par le niveau de complexité atteint par le modèle à ce stade de l'analyse : on admettra ici, sur la base des éléments analysés dans les scénarios précédents, qu'il existe dans ces résultats un certain nombre d'effets agrégés à associer aux investissements BIM et à leur influence sur ces variables. À titre d'exemple et pour éclairer le lecteur sur le type de dynamiques « sous-jacentes » qui peuvent modifier profondément l'évolution des coûts et des temps passés pour les rénovations, la Figure 113 ci-dessous illustre le nombre de rénovations réalisées sur chaque bâtiment $b=1$ à $b=15$ du parc. Certains bâtiments sont rénovés jusqu'à quatre fois, et dans une autre perspective un bâtiment b peut connaître deux à trois fois plus de rénovations selon le LOD demandé. Si DER-VV' n'a pas d'impact visible sur les rénovations recensées, celles-ci mettent en évidence le rôle potentiel du BIM dans l'obtention de résultats contrintuitifs sur le plan économico-financier.

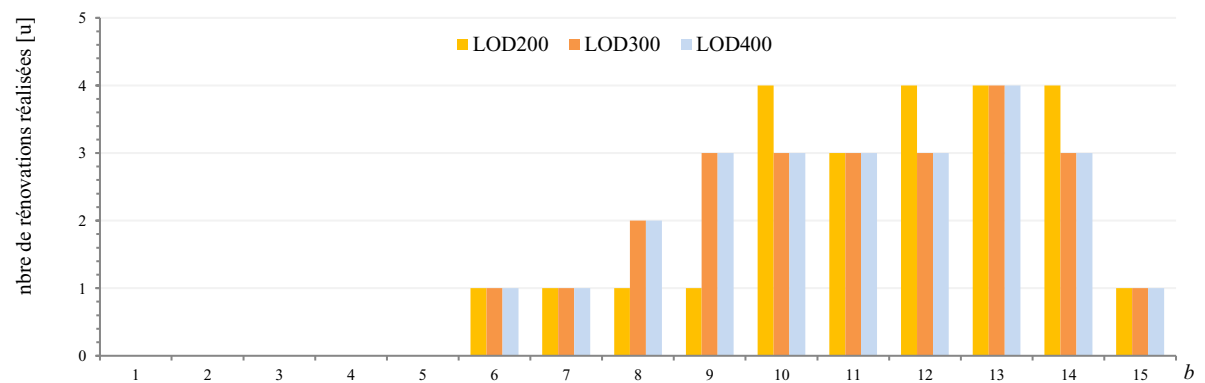


Figure 113. Nombre de rénovations réalisées sur chaque bâtiment $b=1$ à $b=15$ du parc: sensibilité à LOD.

5.2.2. Coût d'un kWh évité

Une question propre à ce niveau d'analyse est la rentabilité financière des investissements déployés pour l'amélioration du parc, que l'on envisage dans ces travaux sous deux aspects : cette section confronte le coût que le gestionnaire paye annuellement pour un kWh évité sur le parc, au coût d'un kWh qu'il aurait consommé.

MACARON cumule au pas de temps t les investissements financiers en rénovation $INV R(t)$ qui sont déclenchés sur le parc. Chaque investissement est actualisé à la date de sa réalisation. Ces investissements cumulés actualisés ramenés au cumul de kWh évités annuellement par les rénovations⁷⁹ effectuées donnent une mesure du coût en €/kWh évité consenti par le gestionnaire. De la même manière, on mesure à $t=32$ le coût en €/kWh évité consenti par le gestionnaire dans le cas où sont cumulés et actualisés non plus seulement les investissements énergétiques mais aussi les investissements numériques $INV R + INV BIM(t)$.

MACARON calcule d'autre part le coût d'un *kWhep mixé équivalent*(t) à un instant t , résultat de la moyenne pondérée du coût des énergies en fonction de leur poids dans le mix énergétique non rénové, pour DER1 et DER2. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 114 : tout point de contact entre les courbes €/kWh évité(t) et €/kWhep mixé équivalent(t), qui ne se produit ici dans aucune des configurations étudiées, représenterait l'année à partir de laquelle le gestionnaire paye moins cher un kWh évité qu'un kWh consommé.

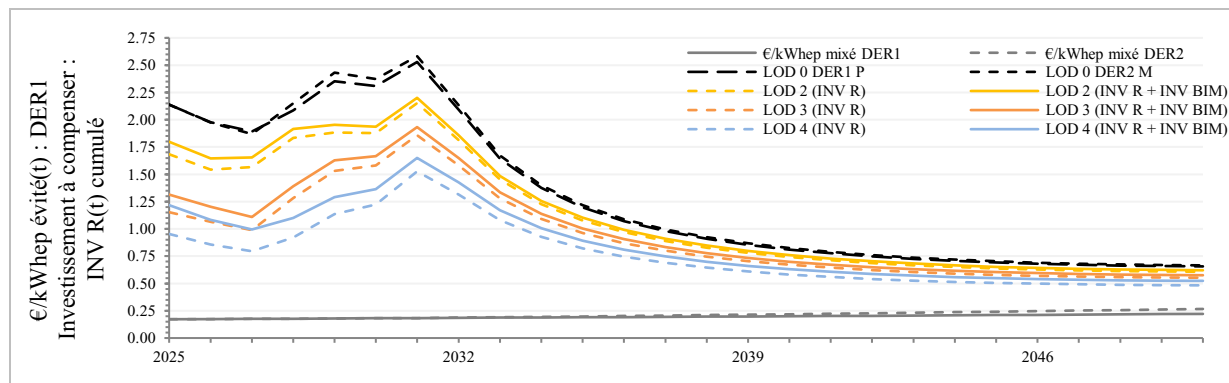


Figure 114. €/kWhep équivalent évité, comparaison au coût €/kWh dépensé : sensibilité à DER.

Déjà on remarque qu'à cette échelle, l'effet de DER semble négligeable. Configuration du modèle trop optimiste, ou réelle incapacité à rentabiliser les opérations ? Rappelons que nous avons retenu ici un grand nombre d'hypothèses de modélisation qui « ferment » l'analyse : par exemple ici le rôle prépondérant de RT. Le changement de RT entraîne une modification profonde de la forme des courbes. Ce sera traité dans le scénario suivant, ELS, qui confronte des stratégies différentes incluant ce type de considération. Dans le scénario présent, ni DER, ni VV' (donc l'impact n'est montré qu'en LOD0 sur ses valeurs extrêmes M et P en Figure 114), ni même le BIM (qui permet néanmoins une nette amélioration par rapport à LOD0) n'influencent le constat majeur de cette section, qui est que dans cette perspective, le gestionnaire ne saurait trouver un intérêt économique à la rénovation s'il assumait la charge financière des kWh consommés. Sachant que nous avons également montré en SC1 que la performance énergétique n'était pas à-même de générer de meilleurs revenus sur le parc, quels sont les leviers restants ?

5.2.3. Rentabilité des investissements énergétiques

On considère dans cette section la rentabilité financière des investissements numergétiques sous la forme du Temps de Retour Actualisé (TRA).

Les investissements numergétiques sont-ils rentables d'un point de vue économique, par rapport à SC0 la situation de référence (sans rénovation du parc) ? On observe le TRA(NumR) obtenu pour les

⁷⁹ Le cumul de kWhévités annuellement par les rénovations est calculé par la différence de $Econs(t)SC4$ et $Econs(t)SC0$ la consommation annuelle en énergie primaire mesurée respectivement dans le présent scénario et dans le scénario de référence.

différentes configurations de DER-VV', en LOD(0,2,3,4) pour les investissements numergétiques INV R+BIM(t) déclenchés tel que détaillé en Table 67.

Table 67. Caractéristiques du Temps de Retour Actualisé TRA (NumR).

Référence SC0	TRA (NumR) Actualisation au 1er investissement numérique ou de rénovation, indifféremment ; Compensation de « INV Rcum + INV Ncum » ;
SC testé LODx SC4	Temps de Retour Actualisé (TRA) calculé par la différence des flux de trésorerie générés en SC4 LOD0 et en SC4 LOD2, 3 et 4.

Pour explorer plus avant les conditions de rentabilisation des opérations de rénovation du gestionnaire on s'intéresse, en plus de DER-VV', à l'impact de potentielles sources de revenus supplémentaires. On modélise à cet endroit trois nouvelles situations incarnées dans MACARON par trois *Cash Flows* CF(t) B, C et D qui viennent s'ajouter à notre hypothèse de référence, le *Cash Flow* CF(t) A. Nos hypothèses de modélisation sont détaillées en Table 68.

Table 68. Caractéristiques des Cash Flows CF(t) A, B, C et D.

CF(t) A	Lorsque le gestionnaire réalise des investissements en rénovation, il ne perçoit ni aides publiques, ni compensation financière sur les loyers. (Situation de référence)
CF(t) B	Le gestionnaire pratique une augmentation « temporaire » des loyers après un investissement en rénovation. Le montant de l'augmentation équivaut le montant de la facture énergétique économisée la première année par le bâtiment rénové, actualisé à 4%.
CF(t) C	Le gestionnaire perçoit des aides publiques, qui couvrent 25% de l'investissement en rénovation. Elles ne sont cependant versées qu'une fois les rénovations terminées (à <i>start R(t+2)</i> en cumulant les délais dans le modèle, soit 3 ans entre la prise de décision de rénover et la perception des aides, la rénovation ayant lieu à <i>start R(t+1)</i>). Ces aides ne sont pas prises en compte par le processus de décision : la requête financière formulée par le modèle concerne toujours 100% de l'investissement à couvrir. On ne « compte pas » sur les aides.
CF(t) D	Le gestionnaire perçoit à la fois des aides publiques à hauteur de 25% de ses investissements en rénovation et une compensation financière sur les loyers.

La Figure 115 page suivante présente pour chaque LOD les montants d'investissements numergétiques déclenchés, ainsi que les flux de trésorerie obtenus dans les situations A, B, C et D et pour chacun. Ces derniers mettent en évidence l'écart avec le flux de trésorerie calculé en SC0. Les variations annuelles d'amplitude entre les situations A, B, C et D y sont difficilement identifiables comme l'impact des différents LOD. On s'assure ainsi néanmoins que toutes les configurations de LOD et CF(t) restent supérieures au flux de trésorerie de SC0 sur la période considérée.

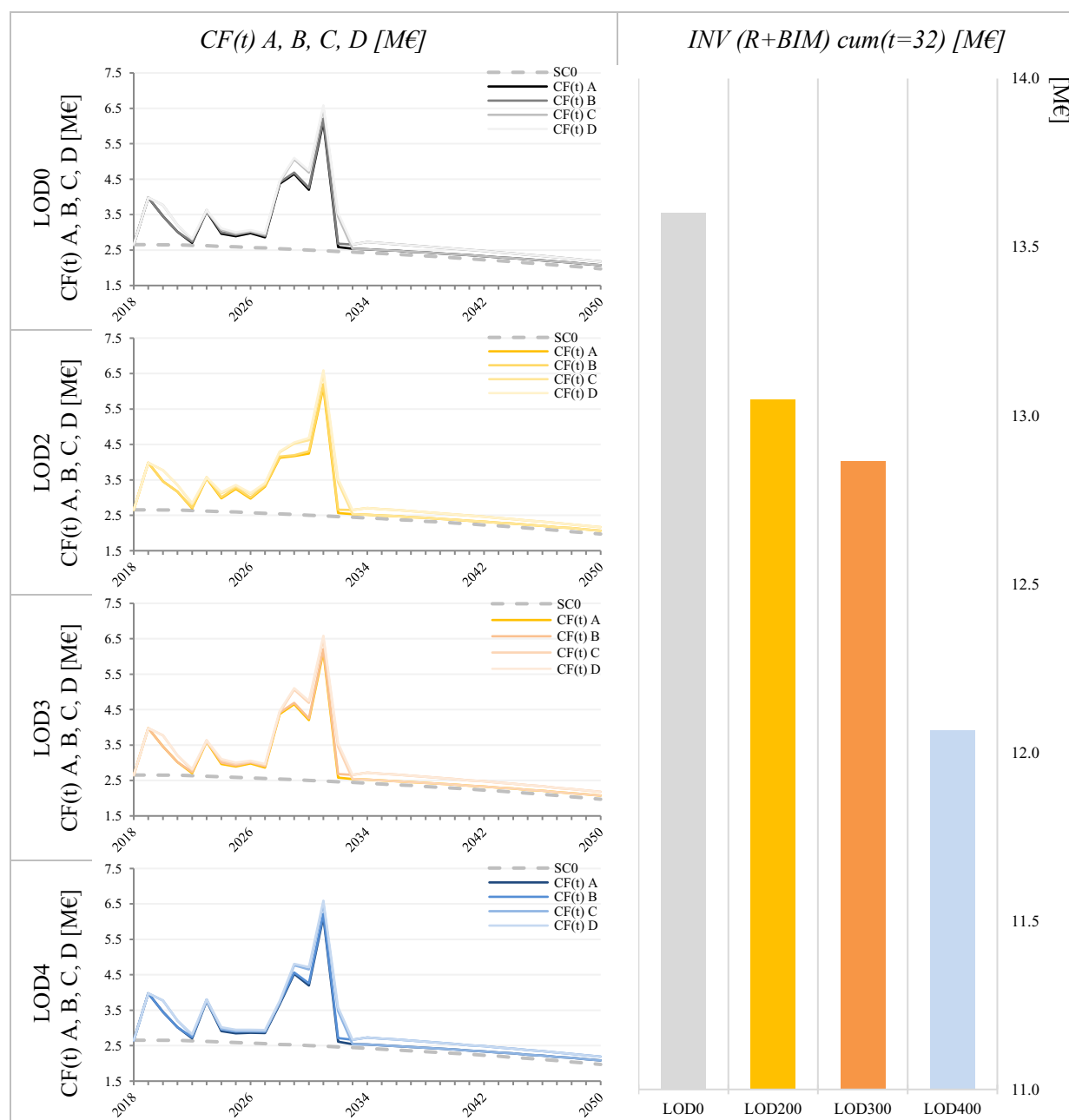


Figure 115. $CF(t)$ et $INV (R+BIM)cum(t=32)$: sensibilité à LOD en situation DER1-VV' N.

Cela est-il suffisant, au vu du delta d'investissement par LOD, pour assurer la rentabilité économique des investissements numergétiques ? Les quelques centaines de milliers d'euros injectées dans le modèle avec CF(t) B, C et D permettent-ils une amélioration de la situation de référence CF(t) A ? MACARON est-il sensible à DER et VV' dans la rentabilisation des investissements stratégiques de gestion du parc ?

Pour le savoir on compare au flux de trésoreries CF(t)SC0 les flux de trésoreries CF(t)SC4 générés par chaque LOD pour les situations A, B, C et D dans toutes les configurations de DER-VV'. Les deltas obtenus, qu'ils consistent en des économies pour le gestionnaire ou en des surcoûts, constituent les montants qui doivent compenser les investissements numergétiques $INV R+BIM(t)$ dans le calcul de TRA (NumR). La Figure 116 en page suivante présente sous forme de diagramme « barres » l'année à laquelle est atteinte la rentabilité des investissements numergétique dans chaque cas. L'absence de barre révèle une incapacité du modèle à rentabiliser les investissements sur la période considérée.

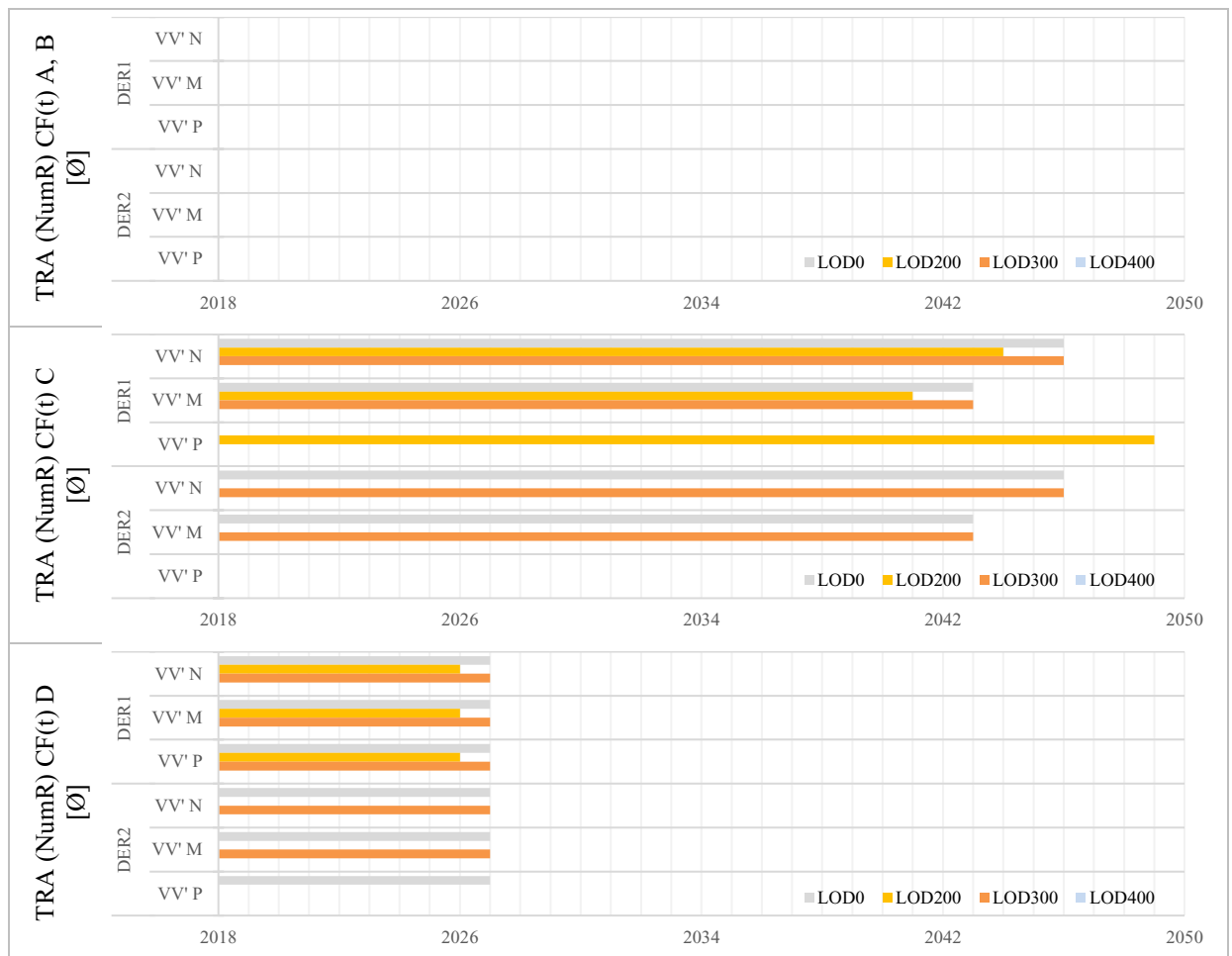


Figure 116. Temps de Retour Actualisé TRA(NumR) SC4 : sensibilité à DER-VV'.

Ici, les flux de trésoreries CF(t) A et B ne permettent aucune rentabilité des investissements numergétiques sur la période considérée quelle que soit la configuration de LOD et DER-VV'. Les aides publiques à l'origine de CF(t) C, puis les aides améliorées de l'augmentation des loyers, en CF(t) D y parviennent sur certaines configurations. Notons tout d'abord la non-rentabilité, quelle que soit la configuration étudiée ici, du LOD4. Les LOD 0, 2 et 3 présentent des temps de retours intéressants en situation D, dans laquelle ils oscillent entre 8 et 9 ans selon les LOD. Notons que le LOD2 est meilleur que LOD0, lequel est identique à LOD4.

La situation C présente des résultats plus aléatoires en fonction des LOD et les temps de retour sont beaucoup plus longs : entre 23 et 31 ans sont nécessaires pour compenser les investissements numergétiques. Il ressort que VV'P est très défavorable. C'est particulièrement vrai en DER2, qui semble également avoir un impact significatif, et négatif, sur le temps de retour actualisé dans les deux situations C et D.

Même avec des aides et des compensations financières intéressantes, la tension progressive du marché des énergies et l'augmentation des coûts de maintenance peuvent ainsi fortement compromettre une situation déjà peu favorable au gestionnaire. Dans ce scénario on a considéré les investissements numergétiques. Peut-être la rentabilité serait-elle meilleure sans le BIM, en ne considérant que les investissements énergétiques ? On posera la question dans le scénario suivant de savoir si cela est parce qu'on a considéré les investissements numergétiques ou si au contraire ces résultats sont le fruit d'une amélioration apportée par le BIM.

5.3. Synthèse SC4 : conclusions sur le contexte énergétique

Les volumes horaires et la performance finale du parc sont moins influencés par les paramètres DER-VV', ceci était prévisible au vu des causalités engagées par SC4. On est en revanche surpris par l'absence de poids de VV' dans ce scénario, qui impacte finalement assez peu les résultats agrégés mis en évidence en capacité financière. Pourtant l'examen minutieux de la question révèle les impacts conjoints du contexte énergétique et de l'introduction du BIM, lesquels génèrent de grosses différences sur les cycles et les coûts de rénovation notamment. Il se produit donc ici un grand nombre d'effets conjugués. Cette hypothèse est confirmée par des TRA fortement différenciés sur ces paramètres. La prise en compte du contexte énergétique nous semble à ce titre cruciale dans une vision à long-terme de la stratégie numergétique, même s'il est une nouvelle fois évident ici que le BIM et l'intensité de numérisation retenue par le gestionnaire jouent un rôle certain dans la rentabilisation des opérations numergétiques, peut-être plus que DER-VV'.

Il est à noter que dans ce scénario le gestionnaire, sans aides publiques ni compensation financière par l'augmentation des loyers, est dans l'incapacité de justifier l'intérêt de ses investissements sur un plan économique. Le TRA est lointain, et sur toute la durée de la simulation le gestionnaire paye plus cher un kWh évité qu'un usager ne paierait un kWh consommé. La seule augmentation des loyers ne suffit pas non plus à atteindre la rentabilité des investissements sur la période considérée. Seules les aides publiques à hauteur de 25% du montant des investissements permettent d'améliorer cette situation (obtention d'un TRA autour de 20 à 30 ans après première rénovation), *a fortiori* lorsqu'elles s'accompagnent d'une augmentation des loyers (TRA inférieur à 10 ans).

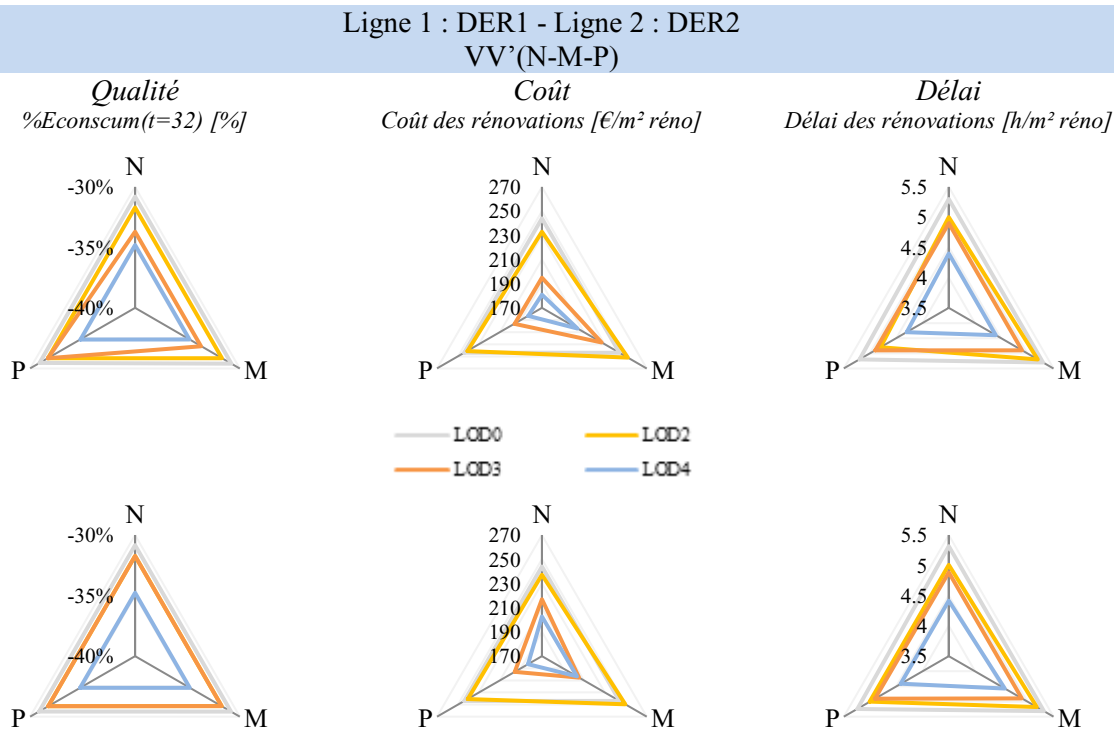


Figure 117. Synthèse DER-VV' : Résorption des consommations kWhép, Coût/Délai des rénovations.

La section suivante ne s'appuie pas sur le choix, dans cette section, d'un scénario de contexte énergétique : ici s'achève l'exploitation du modèle par la variation de paramètres deux à deux. Le scénario d'exploitation ELS traité en suite et fin de ce chapitre, articule les paramètres introduits précédemment sous la forme de ce que nous appellerons des « scénarios de comportement » représentatifs de différents niveaux d'engagement du décideur en faveur de la transition numergétique du parc dont il a la charge. Cette dernière section fait office de synthèse globale des résultats obtenus dans les précédents scénarios d'analyse. On y examine les plages de performance du parc et de l'organisation, en termes de coûts, de qualité et de délais, à attendre de ces alternatives comportementales.

5. Scénario ELS

5.4. Paramètres ELS et causalités simplifiées

Alors que les scénarios SC1 à SC4 exploraient les impacts de couples de paramètres, le scénario ELS considère les impacts agrégés de l'ensemble des paramètres ci-avant présentés. Ainsi l'association des différentes configurations paramétriques susmentionnées permet-elle la description de trois stratégies numergétiques contrastées (rappel) :

- *Early Majority* : Politique numergétique très volontariste
Le décideur favorise la proactivité tant dans sa stratégie de rénovation que dans sa vision numérique de la transition numergétique du parc. Sa politique environnementale est désintéressée.
- *Late Majority* : Politique numergétique attentiste
Les décisions du gestionnaire ne traduisent ni réel désintérêt ni véritable engagement dans les questions énergétiques et numériques. Il favorise l'immobilisme quand cela est possible ou des objectifs peu ambitieux, dans le respect des préconisations expertes et réglementaires.
- *Skeptic* : Politique numergétique peu engagée
Le gestionnaire privilégie la procrastination voire l'inaction. Sa politique environnementale est orientée par les critères économiques, et fixe en conséquence des objectifs *a minima* lesquels s'affranchissent même de certaines contraintes non-réglementaires.

La Figure 118 et l'arbre des causalités en Figure 119 rappellent les caractéristiques des combinaisons ELS et leurs causalités. La table en page suivante rappelle les caractéristiques des scénarios E, L et S.

SC	-	PP	VV1	VL	-	RT	MIX	-	FORM	LOD	-	T0	MAT	-	DER	VV'
E	-				-	1	R	-	1	4	-	0		-		P
L	-	E	1	Y	-	5	E	-	1	2	-	5	1	-	2	N
S	-				-	9	I	-	0	1	-	2		-		M

SC ELS	REFERENCE				ENERGIE			NUMERIQUE						RESS.HUMANES		ECONOMIE											
	E	VL				MIX				LOD						MAT			VV'								
		X	Y	N		I	E	R		0	1	2	3	4		5	1		2	M	N	P					
	VV	0				RT	1				FORM	0					T0				DER	1					
	1				5																						
	4				9																						

PP : Parc social
SC :
● E : Early majority
● L : Late majority
● S : Skeptics

Figure 118. Analyses de sensibilité à ELS.

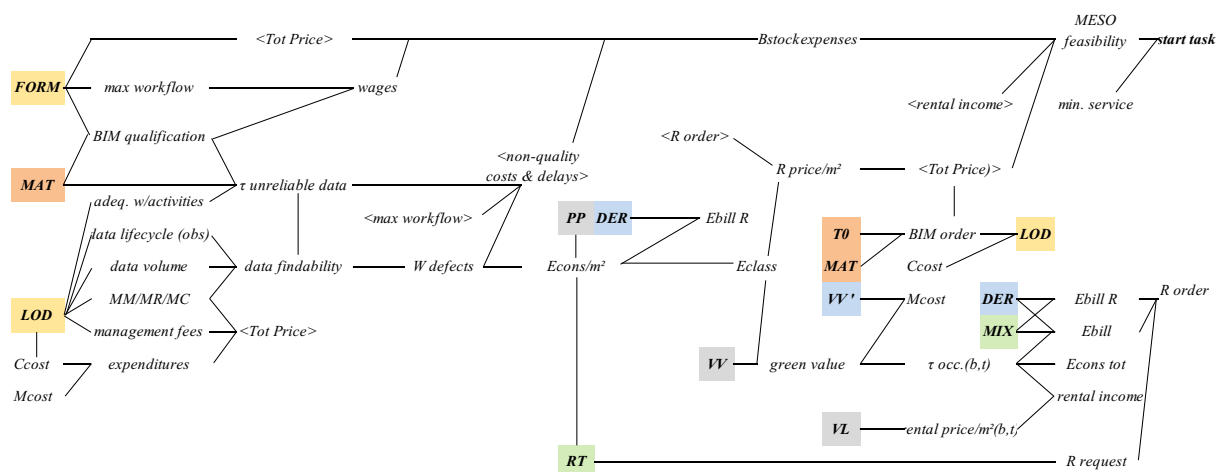


Figure 119. Arbre des causalités simplifié SC ELS.

Table 69. Rappel de la configuration des paramètres pour SC ELS.

	Early majority (E)	Late majority (L)	Skeptic (S)
PP-VV-VL	E-1-Y		
RT	1 Classe A	5 -50%/10ans	9 'As New' - Neuf
MIX	R 100% Elec verte	E 100% Elec	I Inchangé
FORM	1 100% des effectifs		0 0% des effectifs
LOD	4 LOD 400	2 LOD 200	1 LOD 100
T0	0 Time = 2019	5 Time = 50%BIM MAT	2 Time = 2022
MAT	1 BIM maturity 100% = 2025		
DER	2 Passage de la dérive du prix de l'énergie à +2% en 2032 (+1% sinon)		
VV'	P La rénovation engendre une augmentation des coûts de maintenance	N La rénovation ne modifie pas les coûts de maintenance	M La rénovation engendre une diminution des coûts de maintenance

Les objectifs de simulation du présent SC ELS incluent l'investigation des éléments présentés en Table 70.

Table 70. Rappel des objectifs de simulation de SC ELS.

Élément du trilemme QCD	
Q	<i>Inventaire</i>
	<i>Gains TWhep</i>
	<i>Gains TWcumac</i>
	<i>Qualité des rénovations</i>
C	<i>Qualité des flux de données</i>
	<i>Capacité financière</i>
	<i>Consommation des ressources financières</i>
	<i>Coût d'un kWhep cumac évité</i>
D	<i>Non-qualité : Surcoût</i>
	<i>Temps de Retour Actualisé</i>
	<i>Consommation des ressources humaines</i>
	<i>Rénovations reportées</i>
	<i>Non-qualité Retard</i>

5.5. Analyse des résultats de ELS

5.5.1. Qualité des rénovations et gains de performance énergétique

La Figure 120 page suivante illustre la cartographie énergétique du parc PP E obtenue pour chaque configuration E, L et S à horizon de simulation, ainsi que les courbes d'évolution du niveau de qualité des rénovations, enregistrées par le modèle dans les cas d'une stratégie numergétique, ELS(LODx) ou sans BIM, ELS(LOD0).

Trois éléments à tirer de la cartographie du parc :

- Rénovation de toutes les passoires énergétiques et aucun bâtiment au-delà de la classe énergétique C ;
- LOD0 et LODx sont identiques quel que soit le scénario analysé ;
- L et S génèrent le même profil de parc à horizon de simulation bien que les hypothèses RT soient différentes. Le profil généré par le scénario E est de loin le plus performant avec une majorité de bâtiments contenus dans la classe A, quand les profils de L et S n'y comptent aucun bâtiment.

Les courbes de qualité des rénovations présentent pourtant des écarts importants, notamment lorsque sont comparées les stratégies numergétiques ELS(LODx) : E LOD4 rénove à un niveau de qualité moyen de l'ordre de 97%, quand L LOD2 et S LOD1 se stabilisent respectivement autour de 84% et 60%. Les stratégies sans BIM, quel que soit le scénario analysé, présentent un niveau de qualité de

l'ordre de 80% : les configurations E et S présentent des écarts importants entre une stratégie numergétique et une stratégie sans BIM. Aussi nous attendions-nous à ce que la non-qualité, la RT et le BIM aient un impact visible sur l'inventaire du parc dû à des rénovations sans sauts de classe par exemple, mais visiblement si cette situation existe probablement au cours de la simulation elle est résorbée au final. On examine ensuite en Figure 121 les consommations énergétiques de ELS(LODx) et ELS(LOD0).

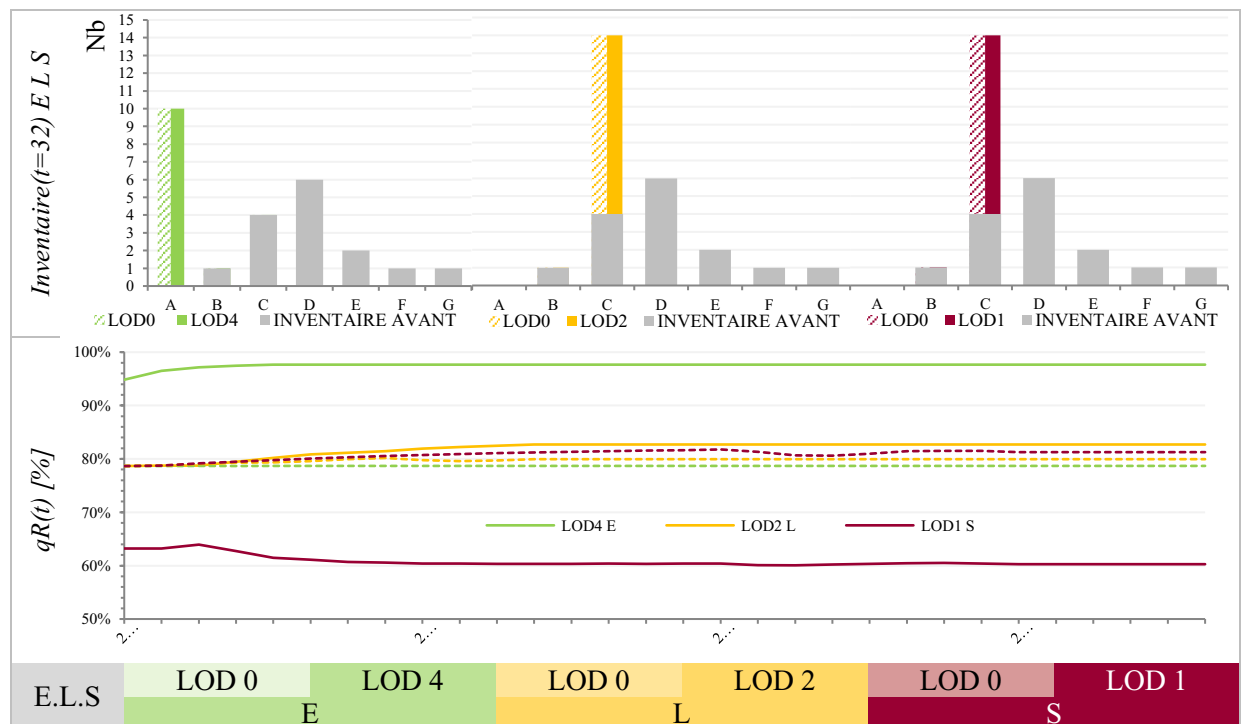


Figure 120. Inventaires des parcs E, L et S à $t=32$ et évolution des indices de qualité des rénovations.

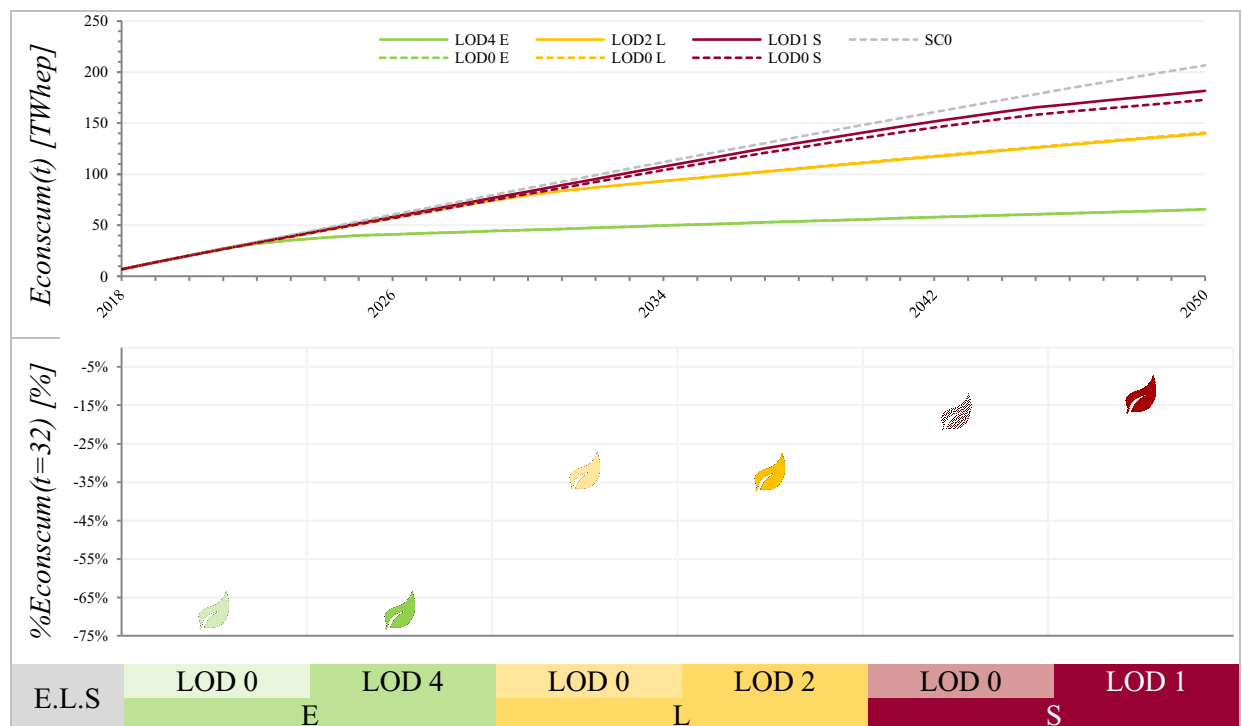


Figure 121. Consommations énergétiques $Econscurm(t)$ et résorption $\%Econscurm(t=32)$ par rapport à SC0.

On observe que le seul effet significatif du BIM se produit en S, où la stratégie numergétique est moins efficace que la stratégie sans BIM. L'écart absolu sur les consommations cumulées n'est toutefois que de quelques points, ce qui est faible au vu des écarts de consommation qui se produisent à un niveau d'analyse plus élevé, entre les scénarios E, L et S :

- E parvient à résorber 70% des consommations mesurées en SC0 dans les deux cas LODx et LOD0 ;
- L parvient à résorber 25% des consommations mesurées en SC0 dans les deux cas LODx et LOD0 ;
- S ne résorbe que 15% des consommations mesurées en SC0 (à $\pm 1\%$ près en fonction du type de stratégie numergétique ou sans BIM).

Note : l'objectif Facteur4 de TEPCV vise un objectif de -75% sur les consommations mesurées en 1990 avant 2050. Ici on ne mesure pas depuis 1990, donc notre propos est à relativiser, mais on note néanmoins que même E ne permet pas d'atteindre l'objectif de -75% sur la période considérée en dépit d'une stratégie énergétique très ambitieuse.

La Figure 122 ci-dessous analyse l'évolution de $TWhcumac(t)$ pour (LODx). On mesure l'écart relatif de $TWhcumac(t=32)ELS(LODx)$ à $TWhcumac(t=32)ELS(LOD0)$. Ici le BIM permet des gains peu significatifs par rapport à une stratégie LOD0 : on relève un effet positif du BIM pour E et L qui génèrent respectivement 4,2% et 0,2% de gains supplémentaires par rapport à la stratégie sans BIM, alors qu'en S le BIM génère un manque à gagner d'environ 11%.

On compare ensuite les gains relatifs en $TWhcumac$ générés par les scénarios L(LOD2) et S(LOD1) par rapport au scénario E(LOD4) : valeurs foncées. L et S produisent ici respectivement -11% et -61% de gains relatifs en $TWhcumac$ à $t=32$.

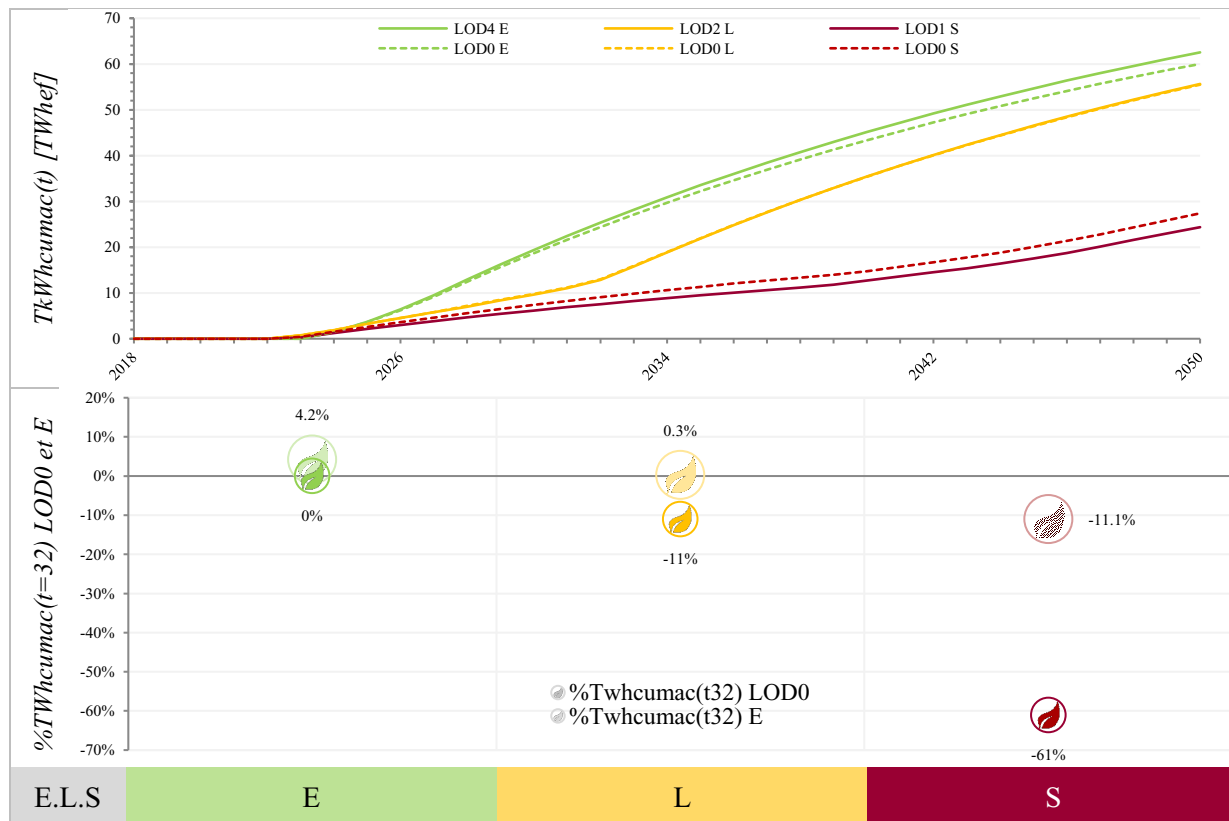


Figure 122. $TWhcumac(t)$ et $\%TWhcumac(t=32)$: écart relatif ELS/LOD0 ; écart relatif LS/E.

5.5.2. Évolution de la capacité financière

Les graphes présentés en Figure 123 ci-dessous montrent que la RT imposée aux scénarios de comportement, couplée à un T0, date de déploiement du numérique dans la stratégie BIM, provoque des déphasages et des variations d'amplitude notables des flux de trésoreries CF(t) ELS entre elles et par rapport à la situation de référence SC0. On note un premier niveau dans les variations d'amplitude en LOD0, et un déphasage temporel à associer à l'évolution de RT, ainsi qu'une variation d'amplitude encore plus importante, et déphasée d'une année en E (t=2 ; 2019) due à l'adoption du BIM.

Dans chaque cas on observe une augmentation des flux de trésorerie coïncidant avec les évolutions de RT. Elles sont le résultat des variations de l'attractivité et des frais de maintenance associés aux bâtiments rénovés.

Dans les scénarios ELS(LOD0), le scénario E est soumis à une politique de maintenance très volontariste : les frais de maintenance sont plus importants après la rénovation. On voit bien ici l'impact de ce surcoût sur le flux de trésorerie annuel de l'organisation, lequel contrairement à L et S (respectivement « pas de changement » et « diminution » des frais de maintenance), présente un cashflow inférieur à CF(t) SC0 après les rénovations. On en déduit que dans cette configuration, l'attractivité générée par la performance du parc classe A ne suffit pas à compenser ces surcoûts de maintenance. En L et S, la rénovation seule peut présenter des externalités suffisamment intéressantes pour améliorer la capacité financière du gestionnaire.

Dans les scénarios ELS(LODx), le BIM permet toujours une nette augmentation des flux de trésorerie par rapport à SC0 et LOD0. Les variations d'amplitude dues au BIM démarrent toutes à des années différentes en raison de T0, 0 en E, 2 en L et 5 en S.

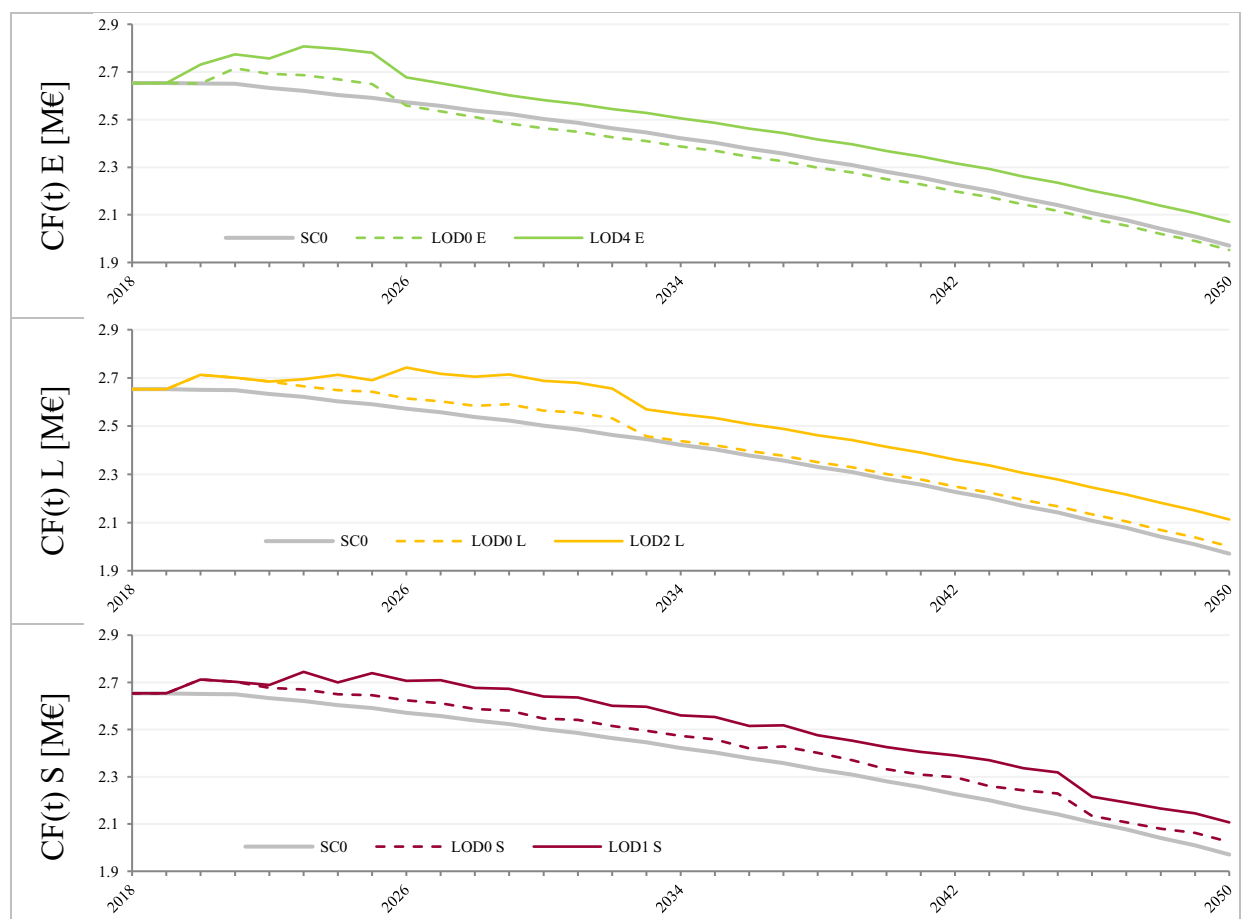


Figure 123. Impact de T0 sur les variations des flux de trésorerie CF(t).

Au lieu de creuser les flux de trésorerie, les investissements génèrent ici des économies par rapport à SC0. (amplitude environ +100 000 à 200 000 € annuels, à relativiser et replacer dans un contexte d'investissements à plusieurs M€ annuels).

S génère la capacité financière la plus stable dans le temps (avec toutefois de gros investissements qui restent à réaliser en fin de simulation). C'est donc sans surprise ce scénario qui génère la meilleure capacité financière moyenne en €/m² loué/an sur la période de simulation comme illustré en Figure 124 ci-dessous. Le BIM permet ici entre 3% (S) et 4,5% (E) de gain relatif sur la capacité financière par rapport à la stratégie sans BIM, et la stratégie numergétique provoque de 3% (E) à 5% (S) de gain relatif sur la capacité financière par rapport à la situation SC0.

En comparant ELS(LODx), le modèle mesure 2% à 3% d'écart relatif entre les capacités financières générées respectivement par L et S par rapport à celle enregistrée en E.

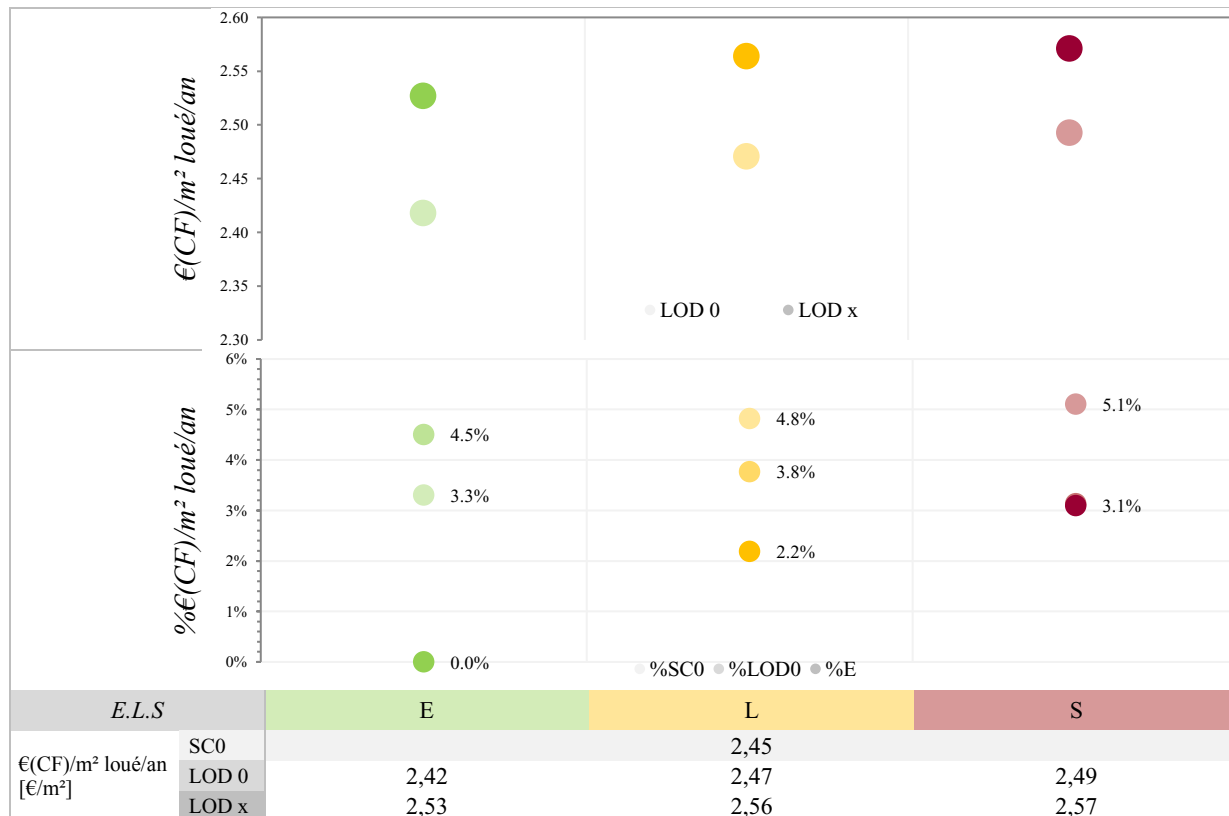


Figure 124. Capacité financière [€/m² loué/an] : sensibilité à ELS.

5.5.3. Coût d'un kWh évité

Dans cette section on reproduit l'analyse menée en SC4. On compare en Figure 125 page suivante pour E, L et S le coût d'un *kWhep mixé équivalent(t)* à celui d'un *kWhep évité(t)* : tout point de contact entre les courbes €/kWhep évité(t) et €/kWhep mixé équivalent(t) représenterait l'année à partir de laquelle le gestionnaire paye moins cher un kWh évité qu'un kWh consommé.

MACARON cumule au pas de temps t les investissements financiers en rénovation INV R(t) qui sont déclenchés sur le parc, pour ELS(LOD0), puis pour ELS(LODx)⁸⁰. Chaque investissement est actualisé à la date de sa réalisation. Ces investissements cumulés actualisés ramenés au cumul de kWhep évités annuellement par les rénovations⁸¹ effectuées donnent une mesure du coût en €/kWhep évité consenti par le gestionnaire.

Ensuite de la même manière, on mesure à t=32 le coût en €/kWhep évité consenti par le gestionnaire dans le cas où sont cumulés et actualisés non plus seulement les investissements énergétiques mais aussi les investissements numériques $INV R + INV BIM(t)$, pour les scénarios ELS(LODx).

⁸⁰ Rappelons à toutes fins utiles que l'introduction du BIM dans les processus internes du gestionnaire modifie les coûts de rénovation, d'où l'intérêt de cette différenciation pour le calcul du coût d'un kWh évité.

⁸¹ Le cumul de kWhep évités annuellement par les rénovations est calculé par la différence de Econs(t)ELS(LOD0/x) et Econs(t)SC0 la consommation annuelle en énergie primaire mesurée respectivement dans le présent scénario et dans le scénario de référence.

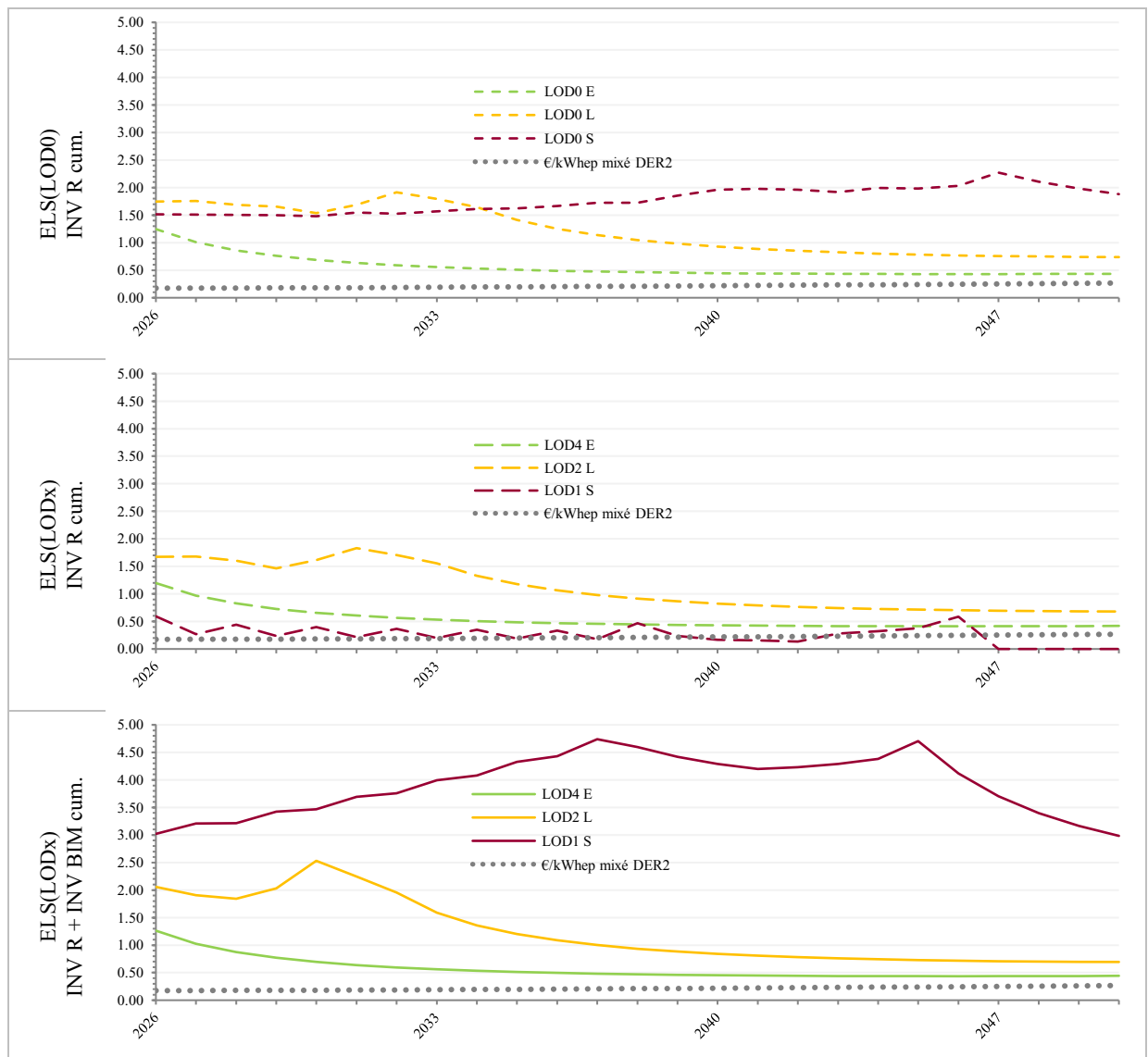


Figure 125. €/kWh évité en E, L et S : comparaison au coût €/kWh consommé.

Ici le constat est sans appel : aucune des configurations ne permet la rencontre des courbes de coût des kWh évités et consommés, à l'exception de S(LOD1) qui devient définitivement inférieure au coût du kWh évité en 2046, soit un peu moins de trente ans après la première rénovation, dans le cas où seuls les investissements énergétiques sont pris en compte. S est par ailleurs la seule configuration à connaître des variations particulièrement importantes d'un calcul à l'autre, les autres scénarios E et L ne sont pas aussi sensibles à la variation des coûts d'investissements.

5.5.4. Consommation de ressources internes : volumes financiers/horaires

Dans quelle proportion le BIM demande-t-il des efforts financiers et humains supplémentaires ?

Dans les analyses suivantes on appellera :

- $X(t)$, les volumes horaires ou financiers initialement requis pour une mission donnée,
- $X(t)+Y(t)$ ou $X+Y(t)$, les volumes horaires ou financiers réellement mis en œuvre pour une mission donnée.

Pour mettre en évidence les variations d'amplitude et le déplacement des volumes horaires et financiers qui se produisent à l'adoption du BIM, on mesure l'écart relatif du volume horaire et du coût des missions $LOD_x(R+MR)$ par rapport aux missions $LOD_0(R)$ pour chaque scénario ELS.

La Figure 126 page suivante illustre les écarts relatifs enregistrés au pas de temps t par le modèle pour les flux (€, h) réellement mis en œuvre $X+Y(t)$ entre LOD_0 et LOD_x .

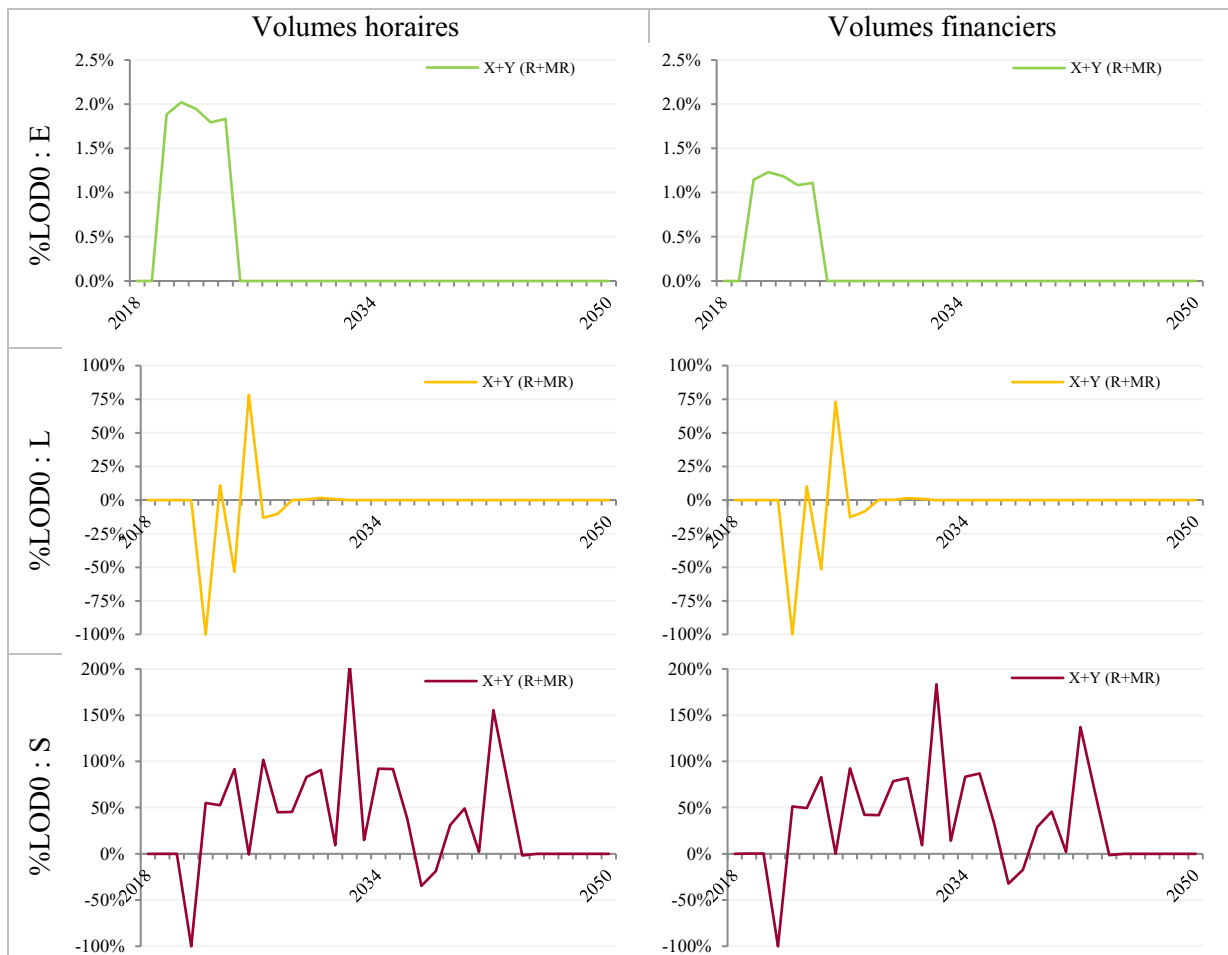


Figure 126. Variation des volumes horaires et financiers de ELS LODx par rapport aux situations ELS LOD0.

En L et S, on observe une variation de -100% en début de simulation : ceci correspond au report⁸² des requêtes de rénovation à la date de déploiement du BIM à $T_0=2022$ pour L et $T_0=2021$ pour S au pas de temps suivant. Ce n'est pas le cas en E où les rénovations démarrent en même temps. On remarque en L que ce phénomène n'est pas suivi d'une variation de +100% : les écarts relatifs mesurés suite à ce report d'opérations proviennent du déphasage créé dans les cycles de rénovation. Il est dès lors difficile d'appréhender avec certitude l'impact du BIM ici, qu'on juge plutôt neutre au regard des résultats beaucoup moins équivoques obtenus en E et S.

En E, le gonflement des temps passés par rapport à une situation sans BIM n'excède pas 2%, et celui des coûts presque deux fois moins. S'il est peu important dans cette configuration, l'effet du BIM n'en est pas moins marquant. En S, après le report des requêtes de rénovation et l'adoption du BIM, la charge de travail est régulièrement deux à trois fois plus élevée que dans la situation sans BIM (variations de +100% à +200% des volumes horaires). Le reste du temps les charges de travail avec et sans BIM sont les mêmes. On peut raisonnablement supposer que, comme en S, les deux seules occasions où le BIM est favorable ne sont dues qu'à une régulation des cycles de rénovation.

Les dynamiques de gonflement des volumes horaires et financiers sont exactement similaires. En revanche le gonflement des coûts de rénovation est moins important que celui des temps passés : ceci est dû à une résorption en interne d'une partie des flux de non-qualité. Lorsque l'occupation des effectifs le permet, ces derniers prennent en charge une partie de la correction des défauts. Les coûts de non-qualité externalisés diminuent, mais la charge de travail réalisée sur une tâche augmente, ce qui explique ici un écart de quelques dizaines de points en S entre le gonflement des flux financiers et celui des temps passés et d'un point en E. Seule la situation L ne génère pas cet écart.

⁸² Pour rappel, les opérations de rénovation des bâtiments et des modèles de données, missions R et MR constituent une tâche de type 1(R) mais la mission de construction des modèles de données MC est associée à la maintenance des bâtiments et des modèles de données M et MM dans une tâche de type 2(C) laquelle repousse les requêtes de rénovations au pas de temps suivant.

Le LOD a ici un impact considérable sur l'ampleur des variations. On admettra cependant qu'un certain nombre d'autres paramètres influencent également ces résultats (formation des effectifs, date de déploiement).

La section suivante s'intéresse à présent au phénomène décrit ci-dessus : la résorption en interne d'une partie des flux de non-qualité, laquelle nous venons de le voir est à l'origine de la différenciation qui est faite dans MACARON des notions de retard et de surcoût associés à la non-qualité.

5.5.5. Non-qualité : différencier l'impact du BIM sur C et D

De tout projet, BIM ou non, émerge la notion de rendement, de productivité, et donc de temps. Cet aspect est traité dans MACARON par la modélisation des ratios de temps improductifs, en gestion de données comme en phase de travaux, qui sont à l'origine de la non-qualité des processus internes du gestionnaire. Un impact indirect du BIM dans le modèle est alors de modifier la structure et les volumes de ces dépenses et temps passés dédiés à la gestion de la non-qualité (réparation ou correction des défauts, erreurs des opérateurs).

Dans notre modèle, les heures allouées à un projet sont rattachées à la fois à un type de mission (M,MM,R,MR) et à des effectifs (M, T, S) en charge de sa réalisation. Les salaires et la répartition des heures de travail étant fonction de ces différents profils d'effectifs, chaque type d'effectif a *a priori* un effet d'amplitude variable sur les volumes horaires et financiers réellement dépensés par l'organisation.

Dans la section précédente, on définissait :

- $X(t)$, les volumes horaires ou financiers initialement requis pour une mission donnée,
- $X(t)+Y(t)$ ou $X+Y(t)$, les volumes horaires ou financiers réellement mis en œuvre pour une mission donnée.

Dans cette section, on différencie les flux internes des flux externes utiles à la réalisation d'une tâche :

- $X(t) = X_i(t)+X_e(t)$, respectivement les volumes (€, h) initialement requis en interne et les volumes (€, h) initialement requis en externe (externalisés par défaut)
- $Y(t) = Y_i(t)+Y_e(t)$, respectivement les volumes (€, h) de non-qualité traités en interne et les volumes (€, h) de non-qualité traités en externe (en sus des externalités par défaut)
- $Y(t) = f(X_i(t))$ seuls les flux internes du gestionnaire génèrent de la non-qualité

Dans notre raisonnement, $Y_i(t)$ ajoute une charge de travail dans l'organisation, donc des délais, donc un impact sur la productivité interne du gestionnaire pour la réalisation d'une tâche.

$Y_e(t)$ ajoute des coûts pour l'organisation pour l'externalisation des volumes (€, h) que la ressource humaine n'aura pas pu traiter en interne.

MACARON considère que les flux $Y_e(t)$ et $Y_i(t)$ s'additionnent pour mesurer la productivité globale à l'échelle d'une opération⁸³ (productivité du groupe [gestionnaire+sous-traitant]).

5.5.5.1. Surcoûts de non-qualité

La Figure 127 page suivante présente les coûts de non-qualité en [€/m² rénovés] mesurés annuellement ainsi que le surcoût global généré par les volumes financiers de non-qualité $Y_e/X(t=32)$ [%] : le volume financier externalisé « en plus » sur le volume financier initialement requis pour la rénovation du parc. On compare ELS LOD0(R) et LODx(R+MR).

⁸³ Cela revient à dire que le manque d'anticipation a pour conséquence dans le modèle que les flux $Y_e(t)$ sont traités à la suite de $Y_i(t)$. Si l'on avait voulu considérer que le gestionnaire anticipe ce manque de temps, et que donc $Y_i(t)$ et $Y_e(t)$ soient traités simultanément, on aurait retenu la valeur la plus élevée de $Y_i(t)$ ou $Y_e(t)$ pour représenter le retard global à l'échelle d'une opération. Si ce n'est pas le cas dans MACARON, le retard global à l'échelle d'une opération peut lui-même faire l'objet de surcoûts de pénalité ce qui modifie encore le rendement financier des opérations.

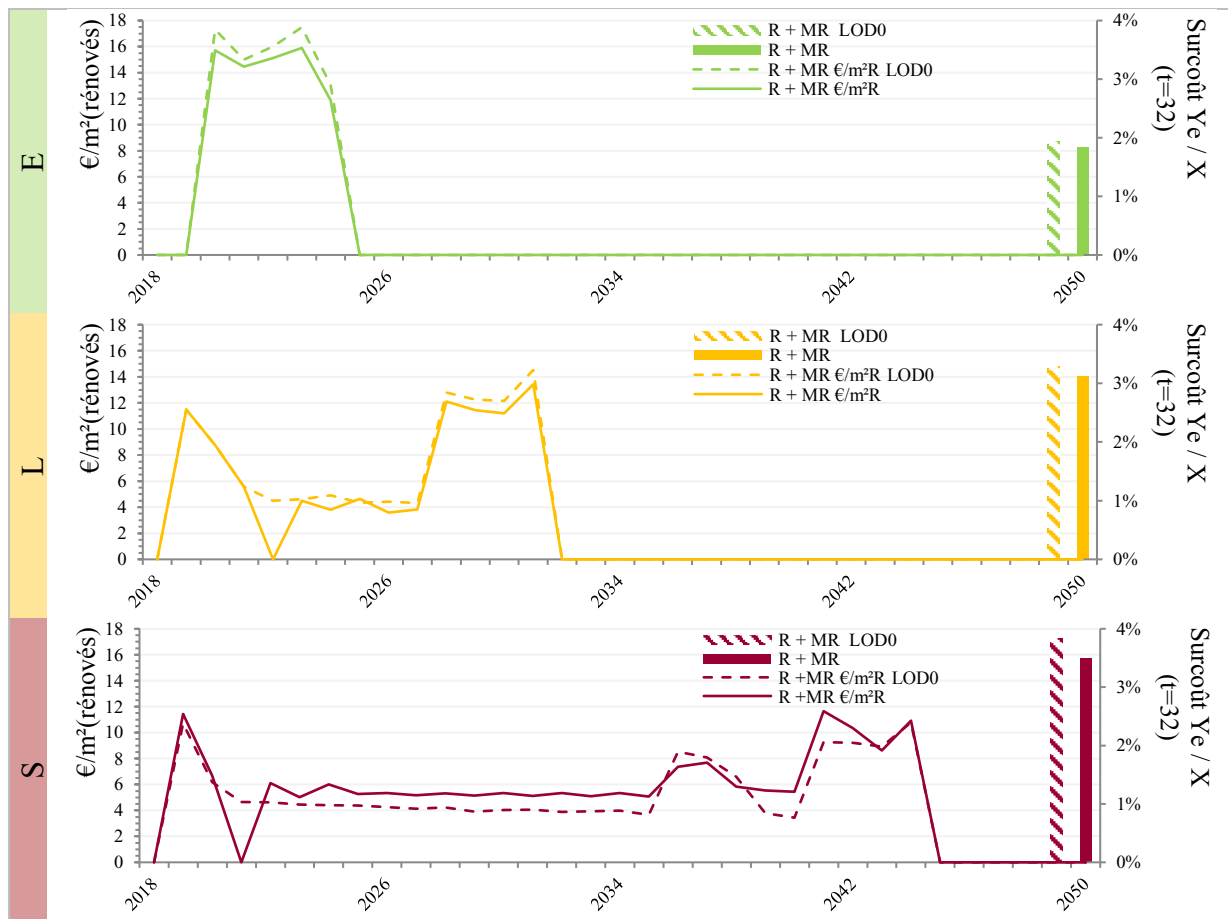


Figure 127. Surcoûts de non-qualité du bouquet [R+MR] en €/m² rénové.

La stratégie E génère les coûts de non-qualité les plus importants : ils atteignent jusqu'à 18€/m² rénové sans BIM, ce qui est légèrement amélioré par le LOD4 qui ramène le coût de non-qualité autour de 15€/m² rénové. Ces coûts paraissent élevés : c'est la conséquence de travaux plus coûteux car plus complexes et plus ambitieux que dans les autres scénarios, qui présentent respectivement des coûts de non-qualité allant de 4 à 12€/m² rénové en L et S.

La non-qualité représente en E la plus faible proportion comparée aux scénarios L et S. Son surcoût est évalué 2% par rapport au coût total initialement requis pour la rénovation du parc, quand L et S voient augmenter la proportion de non-qualité dans leurs flux financiers à hauteur de 3% environ pour L, et 3,5% à 4% pour S avec et sans le BIM. En dépit de coûts plus élevés, la stratégie E fournit une meilleure productivité de ses flux financiers grâce à sa politique volontariste.

Dans le scénario L les coûts de non-qualité sont très similaires avec ou sans le BIM ; dans le scénario S la situation BIMée défavorise le gestionnaire en termes de coûts mais améliore en revanche la productivité des flux financiers sans BIM, en faisant diminuer la proportion totale du surcoût de près de 4% à moins de 3,5% avec le BIM.

5.5.5.2. Productivité du gestionnaire et retard des opérations

Les opérations de rénovation impliquent les flux de travail internes du gestionnaire, et les flux de travail qu'il externalise « d'office ». S'y ajoutent les flux de non-qualité qui sont générés par le gestionnaire. Ceux-ci sont partiellement traités en interne, le reste est externalisé.

On s'interroge sur l'amélioration de la productivité du détenteur du BIM (variation des flux de non-qualité générés par l'organisation) en observant la part des volumes horaires totaux dédiés à la gestion de la non-qualité $Y(t)$ par rapport à la masse de travail produite en interne $X_i(t)$: c'est notre mesure de la productivité des processus de rénovation du gestionnaire (Figure 128 page suivante).

On souhaite ensuite mettre en lumière la conséquence de la productivité des processus internes de l'organisation sur le rendement des opérations de rénovation portées par le couple [gestionnaire + sous-traitant]. Dans cette approche on examine le rendement d'un projet en s'intéressant au retard

(surconsommation de temps) généré par les flux internes et externes confondus (Figure 128 ci-dessous). C'est une première tentative pour montrer les effets de la collaboration BIM sur les processus opérationnels de rénovation.

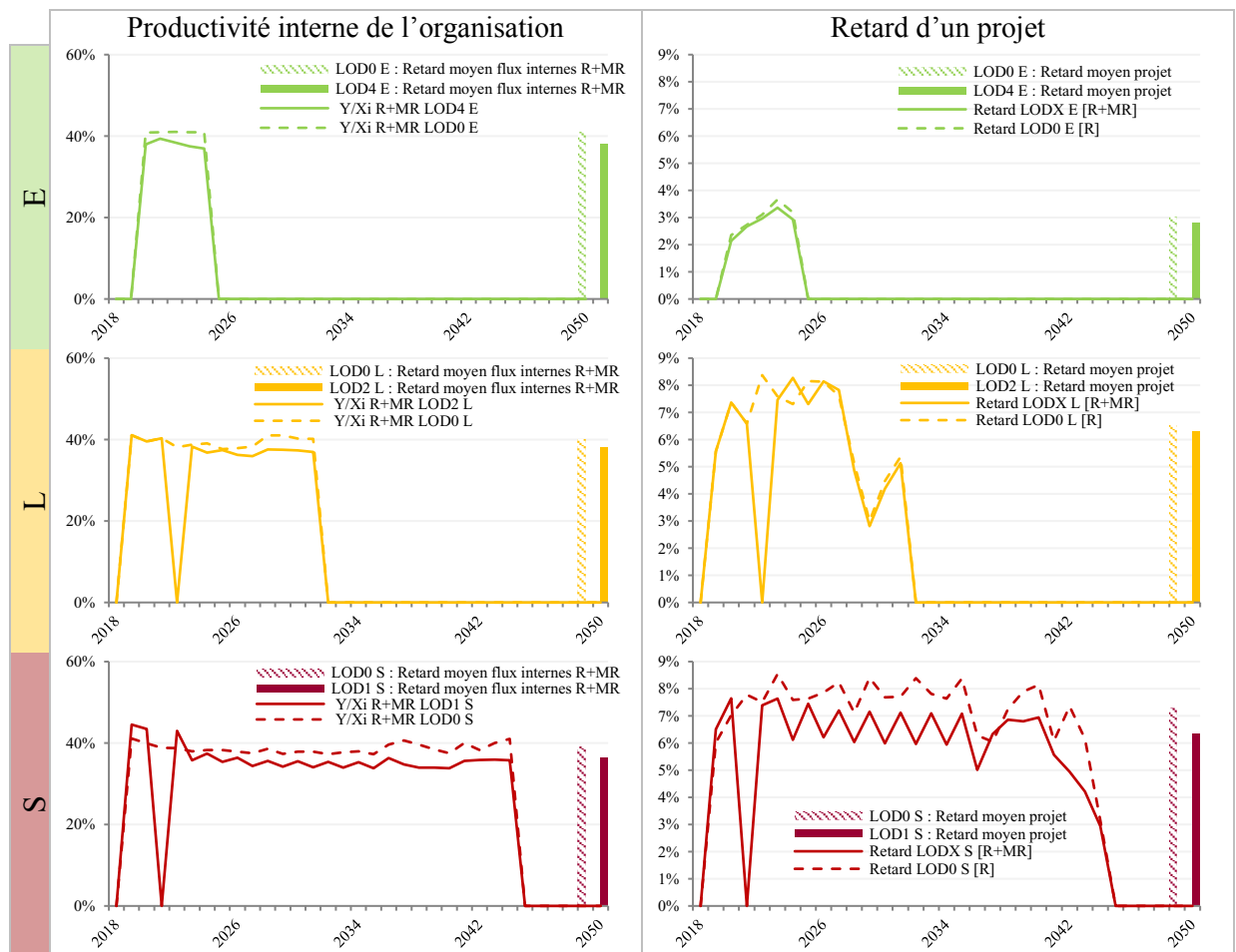


Figure 128. Retard des rénovations (t) : excédent relatif % Y/X (heures).

À l'échelle de l'organisation, l'impact du LOD est très limité en termes d'amélioration des processus internes. En moyenne et quel que soit le scénario considéré, si le gestionnaire devait assumer seul ses flux de travail sans rien externaliser, les travaux de rénovation prendraient 4,8 mois de plus que la base initialement prévue de 12 mois. Et encore cela serait sans compter sur le comportement « explosif⁸⁴ » du modèle.

Avec le soutien d'un sous-traitant parfait⁸⁵, le retard global du projet est évalué à 6 à 7% en moyenne soit environ 12,8 mois par projet de rénovation. La vérité se trouve probablement un peu entre les deux.

Le scénario S est celui qui présente la plus grande variation d'amplitude entre les situations avec et sans BIM. Comme tous les scénarios présentent à peu près le même taux de non-qualité moyen dans leurs processus, évalué autour de 40% en rénovation, il est permis d'imaginer qu'ici la non-formation des effectifs associée aux conséquences positives du BIM collaboratif, mêmes faibles en LOD1, permettent une meilleure réduction du retard qu'en E et L.

⁸⁴ Boucle de rétroaction causée par le renvoi des flux de correction/réparation dans les flux de travail annuels.

⁸⁵ Qui livre par hypothèse son dû sans défaut et sans délai.

5.5.6. Rentabilité des investissements énergétiques, numériques et numergétiques

Selon la même procédure qu'en SC4, on question la rentabilité des investissements consentis par le gestionnaire dans les différents scénarios ELS sous la forme du TRA, le Temps de Retour Actualisé.

Le scénario SC4 explorait la rentabilité des investissements numergétiques à travers l'évaluation de TRA (NumR). Dans cette section, on approfondit notre analyse de sorte à traiter (synthèse en Table 71 ci-après) :

- La rentabilité des investissements pour la rénovation du parc par rapport à SC0 la situation de référence (sans rénovation) : TRA (R) ;
- La rentabilité des investissements pour la rénovation et la numérisation du parc par rapport à SC0 la situation de référence (sans rénovation) : TRA (NumR) ;
- La rentabilité des surinvestissements pour la numérisation du parc par rapport à ELS LOD0 la situation non BIMée (rénovation, sans BIM) : TRA (N).

La stratégie du décideur a-t-elle un impact significatif sur les différents temps de retour calculé par le modèle ?

Table 71. Caractéristiques des Temps de Retour Actualisés
TRA (R), (NumR) et (N).

Référence SC0	TRA (R) Actualisation au 1 ^{er} investissement en rénovation Compensation de « INV R cum » seul : non prise en compte des investissements numériques Temps de Retour Actualisé (TRA) SC0 calculé par la différence des flux de trésorerie générés en SC0 et en LOD0 pour chacun des scénarios E, L et S.
SC testé LOD0 ELS	
Référence SC0	TRA (NumR) Actualisation au 1 ^{er} investissement numérique ou de rénovation, indifféremment ; Compensation de « INV Rcum + INV Ncum » ; Temps de Retour Actualisé (TRA) calculé par la différence des flux de trésorerie générés en LOD0 et en LOD2, 3 et 4 pour chacun des scénarios E, L et S.
SC testé LODx ELS	
Référence LOD0 ELS	TRA (N) Actualisation au 1 ^{er} investissement numérique ; Compensation de « INV Ncum » seul ; Temps de Retour Actualisé (TRA) calculé par la différence des flux de trésorerie générés en LOD0 et en LOD2, 3 et 4 pour chacun des scénarios E, L et S.
SC testé LODx ELS	

Dans ce scénario, comme en SC4 on teste le modèle sur quatre hypothèses :

- CF(t) A : lorsque le gestionnaire réalise des investissements en rénovation, il ne perçoit ni aides publiques, ni compensation financière sur les loyers.
- CF(t) B : le gestionnaire pratique une augmentation « temporaire » des loyers après ses investissements en rénovation. Celle-ci est égale au montant de la facture énergétique économisée la première année après rénovation, actualisé à 4%.
- CF(t) C : le gestionnaire perçoit des aides publiques, qui couvrent 25% de l'investissement en rénovation. Elles ne sont cependant versées qu'une fois les rénovations terminées (à start R(t+2) en cumulant les délais dans le modèle, soit 3 ans entre la prise de décision de rénover et la perception des aides, la rénovation ayant lieu à start R(t+1)). Ces aides ne sont pas prises en

compte par le processus de décision : la requête concerne toujours 100% de l'investissement. On ne « compte pas » sur les aides.

- CF(t) D : le gestionnaire perçoit à la fois des aides publiques à hauteur de 25% de ses investissements en rénovation et une compensation financière sur les loyers.

Quel est le rôle à jouer par les aides publiques ou la stratégie d'augmentation de la valeur locative dans la rentabilité des opérations de rénovations, dans quelle mesure améliorent-elles la situation en fonction de la stratégie numergétique du décideur ?

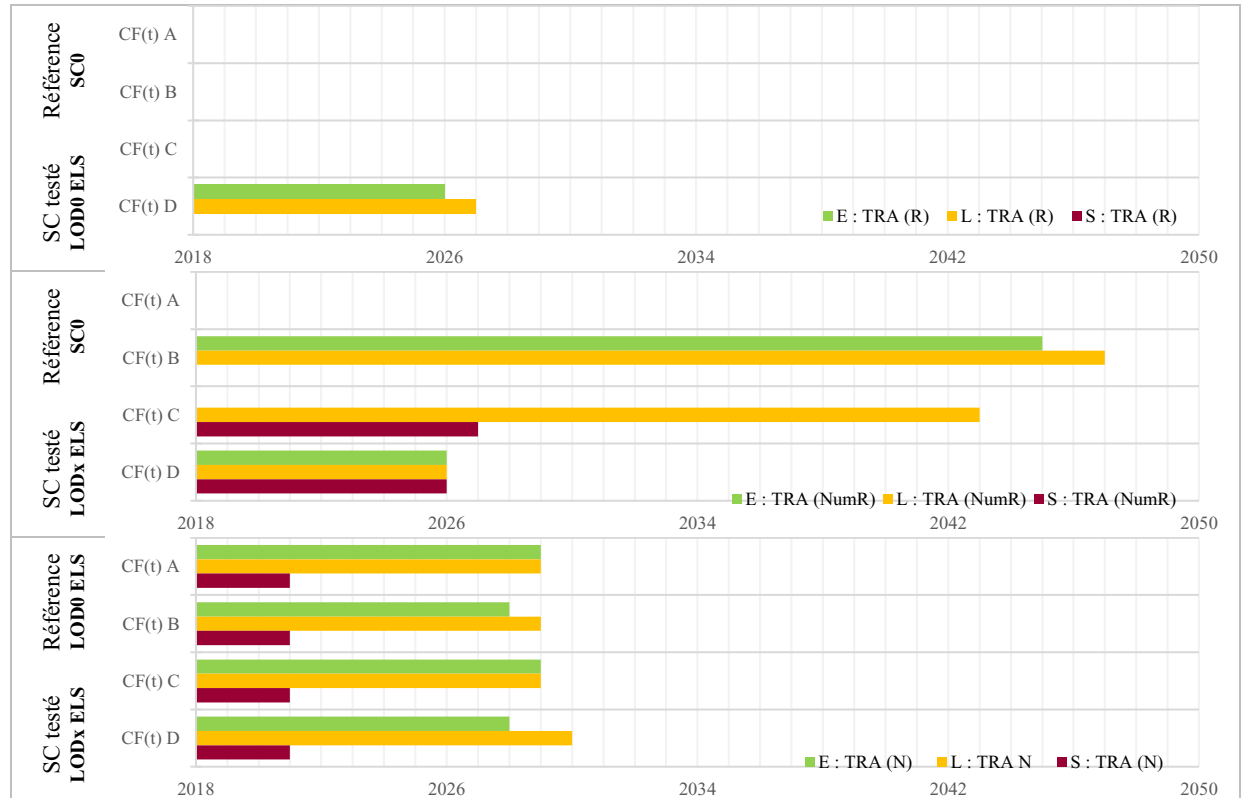


Figure 129. Date des Temps de Retour Actualisés TRA (R), (NumR) et (N).

Si l'on considère les investissements en rénovation isolés, soit en comparant SC0 et LOD0 (ligne 1 Figure 129), seule la configuration CF(t) D permet d'atteindre un TRA (R) sur l'horizon de simulation pour les stratégies E et L. (atteints respectivement en 2025 et 2026, soit un TRA de 7 et 8 ans). Dans les autres cas le gestionnaire ne parvient pas à rentabiliser ses investissements énergétiques sur la période considérée. La conjonction d'aides publiques et de compensations sur les loyers est ici nécessaire pour rendre les rénovations intéressantes. Bien qu'elle soit la configuration *a priori* la plus favorable en termes de coût unitaire des rénovations, la stratégie S ne parvient pas à rentabiliser ses investissements même en CF(t) D. Quel montant d'aides publiques faudrait-il injecter pour y parvenir (voir évaluation politiques publiques perspectives chapitre 8) ?

Les investissements numergétiques (ligne 2 Figure 129) sont plus facilement rentabilisés que les investissements énergétiques : seul CF(t) A ne permet pas au gestionnaire de rentabiliser les opérations menées sur le parc. L'augmentation des loyers CF(t) B permet d'atteindre un TRA (NumR) de 26 et 28 ans respectivement pour les scénarios E et L. Elle n'est pas suffisante en S pour atteindre les conditions de rentabilité. Les aides publiques seules, CF(t) C permettent à la stratégie L de maintenir un TRA (NumR) évalué à 24 ans. À l'inverse de CF(t) B, le scénario S y est rentabilisé (en moins de 10 ans après les premiers investissements) et pas le scénario E : la stratégie très volontariste de E a sûrement généré un gain de TWhef tel que le montant des compensations financières sur les loyers est plus importante que le montant des aides publiques, ce qui est plausible. En CF(t) D tous les scénarios sont rentabilisés avec un TRA (NumR) de seulement 7 ans.

Ce sont les résultats obtenus en TRA (N) qui éclairent notre analyse : à la seule considération des investissements numériques, les gains générés par le BIM sur les flux de trésorerie par rapport à une situation non-BIMée sont suffisamment importants par rapport aux montants d'investissements que

tous les scénarios sans exception sont ici jugés rentables en 2030 ou avant, soit entre 2 (S) et 11 ans max (L). Ici on remarque une moindre variation des TRA (N) en fonction des aides et compensations sur loyers : cela montre que les gains financiers associés aux rénovations (objets desdites aides etc) ne sont pas prises en compte ici ce qui est bien l'objectif de cette analyse.

Ces seuls résultats pourraient identifier la stratégie S comme étant la plus favorable au gestionnaire. Néanmoins rappelons que l'objectif fondamental du modèle est l'amélioration de la performance énergétique globale du parc, aspect sur lequel la stratégie S engendre de piètres résultats. Aussi ce qui retient notre attention ici et qui constituera notre conclusion sur cet aspect du modèle, c'est que le BIM donne de bien meilleures chances aux opérations de rénovation d'atteindre un TRA, même si celui-ci s'avère très long dans certaines configurations. En dépit de cela, sans aides publiques et sans compensations financières le gestionnaire n'a aucune chance de trouver un intérêt d'ordre économique à rénover le parc. Faut-il intégrer des aides pour le déploiement du numérique dans MACARON, ou seulement augmenter ou multiplier les aides pour la rénovation ? Comment justifier auprès des usagers une éventuelle compensation sur loyers ? (en rénovation, diminution de la facture, et en numérique ?)

6. Synthèse du chapitre 7 : conclusions sur SC ELS

Si l'implémentation du BIM a un impact (aussi faible soit-il en fonction du scénario de déploiement) sur les consommations énergétiques cumulées du parc (cf. SC 3 et Figure 130 ci-dessous), il n'en a pas sur la cartographie énergétique finale du parc. On en déduit que la contrainte (€ et heures) engendrée par le BIM et son implémentation est suffisamment faible pour ne pas repousser des rénovations, ou engendrer de la non-qualité telle que les sauts de classe ne sont pas réalisés.

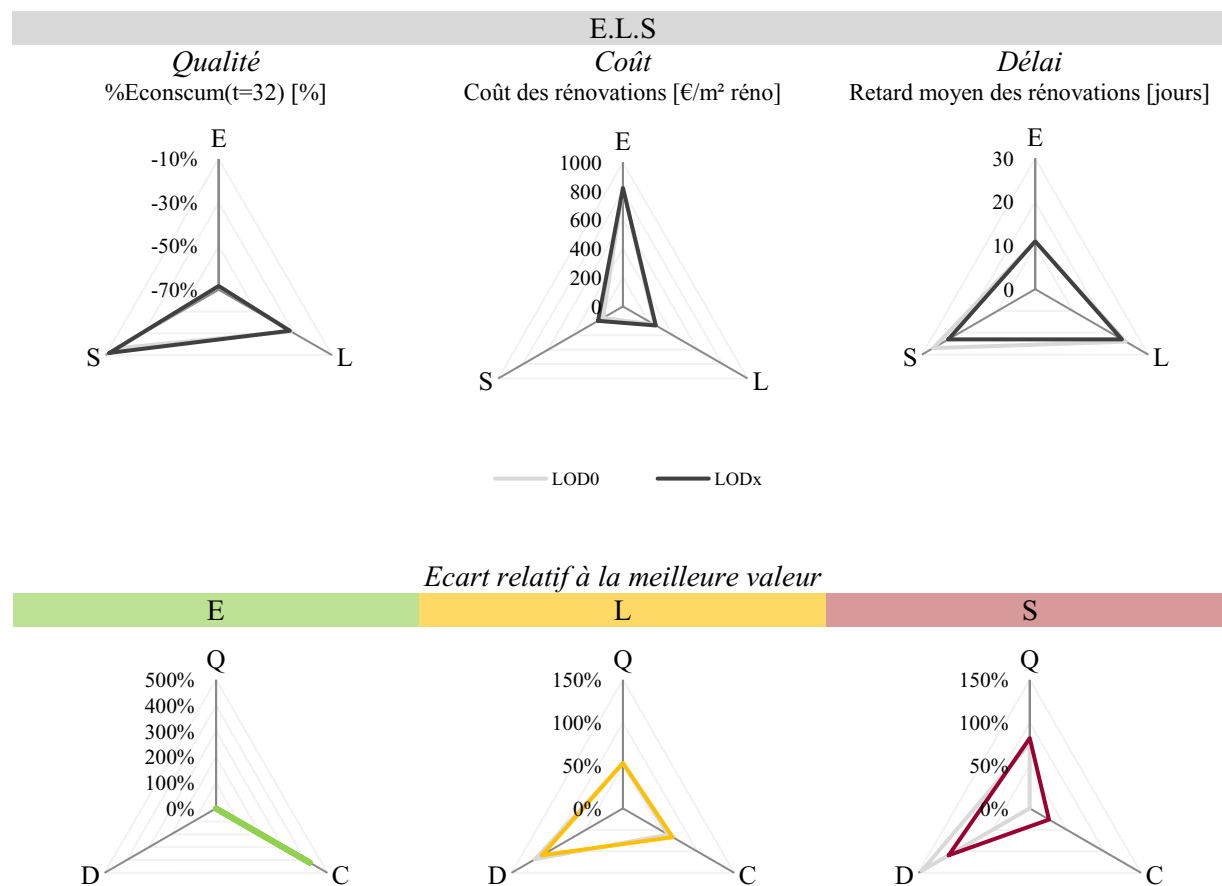


Figure 130. Synthèse ELS : Résorption des consommations kWhep, Coût/Délai des rénovations et écart relatif à la meilleure valeur.

Le BIM provoque une augmentation, non négligeable selon les cas, des volumes horaires et financiers engagés par l'organisation dans ses processus de rénovation. Mais en contrepartie il permet de réduire

les flux de non-qualité, améliorant au final la productivité financière et humaine des investissements produits sur le parc. Si les stratégies moins volontaristes L et S sont les plus performantes sur les aspects économiques, la moindre productivité de leurs flux opérationnels à l'échelle du projet par rapport à ceux générés par la stratégie E permet de considérer à sa juste valeur l'intérêt de la proactivité énergétique et numérique.

Le BIM au vu des présents résultats représente sans conteste un vecteur de qualité ainsi qu'un levier de rentabilisation des rénovations énergétiques, ce qui renforce encore l'idée d'un intérêt majeur à considérer les transitions énergétique et numérique à travers le prisme d'une unique stratégie numergétique en gestion de parc. Et en tous cas, on note que ce ne sont certainement pas les investissements numériques qui sont difficiles à rentabiliser, au contraire avec une rentabilité à deux ans pourquoi se priver d'un déploiement en LOD1 ? Quitte à monter en intensité progressivement (mais pas trop quand même, on a vu que l'attentisme n'est jamais, dans MACARON, synonyme de bonnes performances cf. SC1 en ce qui concerne les rénovations et SC3 pour le BIM) pour maximiser les capacités de l'organisation dans sa quête de performance énergétique : cette question sera brièvement abordée au chapitre suivant.

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS PERSPECTIVES

*« After all,
the wrong road always leads somewhere. »*
George Bernard Shaw

1. SYNTHÈSE GÉNÉRALE	253
2. PERFECTIONNEMENT DU MODÈLE : MACARON 1	254
2.1. SCÉNARIOS D'ANALYSE : AUGMENTER LE CONTRASTE DES STRATÉGIES NUMERGETIQUES	254
2.1.1. Objectifs numergétiques.....	254
2.1.2. Politiques de maintenance et gestion de la non-qualité.....	254
2.1.3. Hypothèses dynamiques	255
2.2. BOUCLES DE RETROACTION : COMPLEXIFIER LES PROCESSUS DÉCISIONNELS	256
2.2.1. Vétusté : obsolescence progressive des objets techniques	256
2.2.2. Valeur verte : valoriser la performance énergétique	256
2.2.3. Renforcement des contraintes financières.....	257
3. ÉVOLUTION DU MODÈLE : MACARON 2	257
3.1. PISTES DE MODÉLISATION DU NIVEAU NANO : L'USAGER	257
3.2. PISTES DE MODÉLISATION DU NIVEAU MACRO : L'ENSEMBLE URBAIN	258
4. MISE À PROFIT ET PRODUITS POTENTIELS DE MACARON.....	260
4.1. MACARON PP : ANALYSE DES POLITIQUES PUBLIQUES.....	260
4.2. MACARON ST : ÉVALUATION DES STRATÉGIES DE TRANSITION NUMERGETIQUE	260
4.3. À PLUS LONG TERME	261

1. Synthèse générale

Le présent travail de thèse identifie la transition numérique, dont fait partie le BIM, et la transition énergétique des bâtiments existants visée par les rénovations, comme inévitables dans la mutation des parcs immobiliers, des organisations et de la filière construction en général. L'objectif poursuivi dans nos travaux est de proposer une représentation systémique de la complexité des interrelations directes et indirectes entre transition énergétique et transition numérique. Cette thèse participe ainsi à révéler la possible conjonction de ces deux transitions socio-techniques majeures, sa force, sa viabilité et son intérêt dans une stratégie numergétique d'amélioration d'un ensemble de bâtiments existants.

Notre investigation préliminaire nous a menés à borner notre modélisation au cas du gestionnaire de patrimoine-maître d'ouvrage, acteur majeur de l'aménagement et de l'exploitation des ensembles bâtis. Les deux niveaux d'intervention MICRO (objet technique) et MESO (organisation), présentés dans ces travaux ont été pensés dans une vision plus large intégrant des réflexions sur les comportements individuels des usagers (NANO) et la diversité des parcs, des agents et des processus qui prennent place à l'échelle urbaine (MACRO). Dans notre vision du SORON (Système Objet de la Rénovation Orientée Numérique), nous avons par ailleurs associé quatre thématiques approchant la Performance Énergétique (PE) des bâtiments existants, la Capacité Financière (CF) de l'organisation gestionnaire, les besoins en Ressources Humaines (RH) et le Déploiement Numérique (DN) du BIM au sein de l'organisation.

Selon les principes et les méthodes de la modélisation par la Dynamique des Systèmes Complexes (DSC), nous avons développé une démarche rigoureuse de conception et de construction d'un modèle : MACARON (Modèle d'Analyse Coûts-Avantages de la Rénovation Orientée Numérique). MACARON nous a permis d'analyser successivement différents scénarios d'exploitation du parc homogène de bâtiments résidentiels pour tenter de faire émerger des éléments de compréhension et d'analyse des interrelations propres à la transition numergétique. Des résultats prometteurs ont pu être mis en évidence concernant l'existence de potentiels leviers de performance à leur rencontre.

En effet le modèle a montré une bonne capacité à produire et analyser différentes stratégies du décideur gestionnaire. MACARON permet d'exprimer l'inégalité des niveaux de contraintes qui s'exercent sur le pouvoir d'action des décideurs et d'analyser des chemins de transition progressifs et proactifs : le modèle révèle les configurations les plus défavorables au gestionnaire, notamment par l'évaluation de l'impact économique du BIM et des enjeux liés à l'évolution des besoins humains et informationnels qu'il requiert. On traite les volumes horaires et financiers engagés par l'organisation dans ses processus de rénovation, les flux de non-qualité, la productivité financière et humaine des investissements produits à l'échelle du projet et de l'organisation. Le modèle permet l'évaluation de la performance énergétique de stratégies numergétiques plus ou moins volontaristes afin de mesurer et considérer à sa juste valeur l'intérêt de la proactivité énergétique et numérique. Les résultats obtenus identifient le BIM comme un vecteur de qualité ainsi qu'un levier de rentabilisation des rénovations énergétiques, ce qui renforce encore l'idée d'un intérêt majeur à considérer les transitions énergétique et numérique à travers le prisme d'une stratégie numergétique en gestion de parc. MACARON met ici en évidence la faisabilité d'élaborer une vision systémique de la transition numergétique intégrant les contraintes des organisations et des objets techniques auxquelles elles s'intéressent.

Les produits de notre modélisation pourraient servir utilement des développements visant la diversification des disciplines, des objets et des objectifs de la prise de décision numergétique tant dans les sphères publiques que privées. Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont été menés de sorte à ce qu'une grande liberté puisse être autorisée dans les développements ultérieurs. Tout d'abord, la modélisation multi-échelle, déjà ébauchée par la combinaison MICRO-MESO, autorise différents niveaux d'analyse, et donc de questionnement. Par ailleurs, la modélisation modulaire autour de quatre thématiques permet d'envisager la prise en compte de nouveaux besoins ou d'avancées scientifiques. Notre vision du potentiel de MACARON en termes de possibles développements académiques fait l'objet de la section suivante. Quelques pistes d'amélioration et de perfectionnement du modèle y sont proposées pour permettre, dans des développements ultérieurs, d'orienter l'utilisation de MACARON vers deux cibles principales : l'analyse à moyen-terme des politiques publiques en matière de transition numergétique d'une part, et l'aide à la définition de Stratégie de Transition numergétique pour les organisations d'autre part.

2. Perfectionnement du modèle : MACARON 1

Au cours de la conception et de la construction de MACARON, un grand nombre de développements potentiels supplémentaires ou connexes ont été identifiés et proposés à l'échelle globale du modèle. Ces réflexions ont pour partie été suspendues pour assurer la preuve de concept centrée sur notre objectif de modélisation. Le choix a donc été fait de désactiver certaines boucles de rétroaction et de renoncer à un certain nombre de scénarios d'analyse initialement envisagés. La présente section suggère quelques-unes de ces pistes de modélisation et d'analyse, lesquelles pourraient faire l'objet de perfectionnements du modèle à court-terme.

2.1. Scénarios d'analyse : augmenter le contraste des stratégies numergétiques

2.1.1. Objectifs numergétiques

Nous avons modélisé dans MACARON des stratégies de rénovation et de numérisation uniformes à travers le parc, imposant un scénario commun à tous les bâtiments, variable seulement en fonction du temps. La différenciation des objectifs de rénovation et de numérisation à travers le parc pourrait se traduire, dans MACARON, de plusieurs manières. Par exemple, MACARON permet d'envisager la modélisation de scénarios différenciés de rénovation des bâtiments. De nombreuses stratégies de rénovation peuvent être représentées, qu'il s'agisse de diversifier les niveaux de performance énergétique visés (par exemple contrainte de rénovations passives ou augmentation des seuils de requête des rénovations) pour chaque bâtiment ou d'intégrer des objectifs (également différenciables à travers le parc) de décarbonation du parc.

D'autre part, la construction des modèles de données BIM est considérée dans ces travaux comme ponctuelle et globale à l'échelle du parc. Plutôt que de considérer la numérisation de l'ensemble du parc à un instant donné et à un LOD donné, MACARON pourrait aisément considérer les opérations de rénovation comme une opportunité de construire progressivement les modèles BIM des bâtiments jusqu'à obtention du jumeau numérique du parc. Un autre scénario pourrait consister à construire les modèles BIM de l'ensemble des bâtiments du parc à un LOD faible, puis à faire évoluer les modèles BIM lors de la rénovation des bâtiments. Enfin dans une vision élargie, la différenciation des niveaux de LOD choisis par de multiples intervenants, en fonction de leurs besoins propres ou des caractéristiques des objets techniques, questionnera les conditions de l'interopérabilité des modèles BIM et les interactions de différents niveaux de LOD dans les processus collaboratifs.

Dans MACARON a également été prévue une relation causale entre niveau d'intégration du BIM multi-agents (isolé, fédéré, intégré) et niveau de maturité du BIM (1, 2 ou 3 : voir chapitre 1). Bien que stratégique, cette relation a été désactivée dans les travaux en raison de la difficulté à en préciser la nature. Elle n'est représentée que pour amorcer une réflexion sur le niveau d'intégration du BIM.

2.1.2. Politiques de maintenance et gestion de la non-qualité

MACARON est modélisé pour tester différentes configurations de la politique interne du gestionnaire. Tels qu'introduits dans MACARON, plusieurs axes de modélisation pourraient permettre d'approfondir notre vision de la gestion des flux de travail associés aux processus d'exploitation des bâtiments, dont notamment :

- La politique de gestion des flux de non-qualité,
- La stratégie de maintenance,
- La stratégie de sous-traitance du gestionnaire de patrimoine.

Dans ces travaux, les opérateurs (membres de l'organisation gestionnaire) réparent l'intégralité des erreurs ou défauts découverts, qu'il s'agisse de défauts techniques engendrés lors des opérations de rénovation ou d'erreurs générées en gestion des données. D'autres alternatives de gestion des flux de non-qualité pourraient utilement être expérimentées de sorte à alimenter de potentiels développements du SORON multi-agents.

Sur la base des développements produits en MIRH, MACARON est à-même de reproduire les processus opérationnels de maintenance de sorte à alimenter la variable qM : la qualité des flux de maintenance. Associée à qR (l'indice de qualité des flux de rénovation), elle permettrait d'enrichir les interrelations entre politiques d'exploitation et de rénovation, en supposant que ces dernières

impactent ensuite la qualité des travaux de maintenance ultérieurs. Ceci autoriserait la modélisation dynamique de la perte progressive de performance énergétique des objets techniques au cours du temps en fonction de différentes stratégies de rénovation et de maintenance.

La stratégie de sous-traitance appliquée par le gestionnaire revêt deux aspects : la quantité de travail externalisé et la qualité du travail fourni par les sous-traitants. Il serait intéressant de pouvoir analyser la sensibilité du modèle à la variation simultanée de ces deux facteurs. En effet dans ces travaux on a estimé une part constante des travaux externalisés pour la rénovation et la gestion des données du parc, ainsi qu'une sous-traitance parfaite laquelle ne génère ni retards, ni flux de non-qualité. Le développement du SORON vers un système multi-agents peut trouver un intérêt à confronter la politique de gestion de non-qualité du gestionnaire de patrimoine et sa stratégie de sous-traitance pour évaluer la performance résultante des processus ainsi mis en œuvre sur le parc.

2.1.3. Hypothèses dynamiques

Les coûts de rénovation et de numérisation appliqués dans MACARON ont été discrétisés en fonction de l'intensité des rénovations dans un cas, de l'intensité de la numérisation dans l'autre. Ces prix sont considérés fixes sur toute la durée de la simulation. MACARON pourrait permettre de discuter une éventuelle évolution de ces prix dans le temps. Cela peut soit se traduire par une boîte noire fondée sur des hypothèses trouvées dans la littérature, soit, dans une perspective d'évolution plus poussée du modèle, prendre la forme d'une boucle de causalité avec des considérations de type maturité produit, évolutions technologiques, industrialisation des processus etc.

De la même manière, MACARON n'exprime pas encore l'évolution des salaires de la ressource humaine, ni en fonction du temps, ni en fonction de l'évolution des profils ou de la compétence des personnels. La structure du modèle a toutefois été pensée pour introduire d'éventuels développements futurs de cette question spécifique, laquelle nous semble tout à fait intéressante dans l'analyse de la mutation des organisations.

Par ailleurs nos résultats en chapitre 7 ont montré une faible sensibilité du modèle à nos hypothèses d'évolution du prix des énergies à horizon de simulation. Il serait intéressant d'approfondir l'examen de cette partie de MACARON et de tester les conditions limites du modèle à cette problématique spécifique, en modélisant d'autres scénarios énergétiques et environnementaux, comme par exemple des dérives plus importantes du prix des énergies, voire des situations de crise énergétique. En particulier MACARON permettrait à ses potentiels utilisateurs de fonder des hypothèses argumentées quant au potentiel d'évolution des énergies renouvelables et fossiles et ainsi de contribuer utilement au débat sur ce thème.

Une autre question soulevée durant la construction du modèle est celle de la valeur à employer pour la quantification du coefficient d'énergie primaire (CEP) appliqué à l'énergie électrique. Fixé à 2,58 depuis les années 70, il fait actuellement l'objet de controverses explicites comme le soulèvent les propos recueillis dans (Sidler, n.d.) et dans l'actualité récente⁸⁶ : « *Le 2,58 est déjà une anomalie, car en réalité la France se situait au moment où il a été choisi entre 3,2 et 3,6. Elle est aujourd'hui à 2,74* », explique Sidler. « *Or l'objectif avancé de décarboner le secteur des bâtiments en y favorisant le vecteur électrique ne peut pas fonctionner s'il passe par une dégradation de la performance.* » avance la note d'analyse de l'association négaWatt⁸⁷ citée dans le même article. Dans ce contexte, MACARON pourrait permettre de modéliser différentes hypothèses de quantification, dynamiques ou non, du coefficient CEP et d'en mesurer l'impact sur la performance énergétique et environnementale des constructions à plus ou moins long-terme.

Dans le même ordre d'idée, MACARON offre également la possibilité d'examiner, comme le préconise (Gollier, 2005), l'impact dans le modèle du taux d'actualisation annuel des investissements financiers rendu dynamique et dépendant de l'horizon de simulation⁸⁸. Dans une vision élargie, de

⁸⁶ https://www.batiactu.com/edito/re-2020-note-cadrage-qui-effraient-certains-acteurs-56028.php?MD5email=063ca65ccb43a423500d66d6520b326b&utm_source=news_actu&utm_medium=edito&utm_content=article

⁸⁷ <https://negawatt.org/Favoriser-le-chauffage-electrique-peu-performant-ou-fermer-les-centrales>

⁸⁸ (Gollier 2005) mentionne un taux d'actualisation réel autour de 5% pour des horizons temporels inférieurs à 30 ans ; 2,5 % à 3 % par an à un horizon de 100 ans, et autour de 1 à 2,5 % par an pour des horizons très éloignés.

telles considérations participeraient à réformer l'aspect statique des analyses coût-avantages et du bilan socio-économique actuel de la valeur d'un projet.

De manière beaucoup plus générale, la construction de MACARON repose sur des hypothèses de causalité et de quantification, dont la validation se heurte à un manque de données statistiques. Aussi, l'acquisition de connaissances expertes auxquelles confronter les comportements et résultats du modèle permettrait-elle de renforcer ou réviser utilement notre vision du SORON. On peut suggérer en ce sens d'entreprendre des travaux spécifiques visant le monitoring des organisations.

2.2. Boucles de rétroaction : complexifier les processus décisionnels

2.2.1. Vétusté : obsolescence progressive des objets techniques

Dans ces travaux, la qualité des processus de maintenance des bâtiments qM et leur impact sur la performance énergétique du parc ont été écartés de nos objectifs de simulation. Néanmoins, la modélisation de la perte de performance énergétique progressive, due à la dégradation matérielle des enveloppes et systèmes des objets techniques, serait tout à fait pertinente dans notre étude pour évaluer la conjonction des rénovations et de la maintenance dans l'amélioration du parc. Par ailleurs cet aspect de la création et du maintien de la performance des bâtiments existants rejoindrait l'hypothèse de MACARON de faire de l'état général du bâtiment (son niveau de vétusté, entre autres énergétique) un paramètre central influant non seulement sur la fréquence des travaux et donc sur le confort des usagers, mais aussi sur l'image de l'organisation gestionnaire et sur l'attractivité des biens immobiliers dont il a la charge. La quantification d'une telle boucle de rétroaction entre la qualité des travaux de maintenance et l'occupation du parc renforcerait utilement les leviers d'incitation modélisés dans ces travaux au travers de la valeur verte. De façon pratique, cette boucle peut être construite de sorte à ce que l'indice d'attractivité des constructions relève de plusieurs facteurs représentatifs du confort de l'utilisateur (performance énergétique, vétusté, fréquence des travaux passés et valeur locative, à titre d'exemple) eux-mêmes dépendant directement de la politique interne du gestionnaire. Ainsi l'occupation du parc ou le seuil de vétusté acceptable peuvent-ils être objectivés sous la forme de différents scénarios de rénovation et de maintenance, dont un exemple pourrait être le déclenchement d'opérations de maintenance irrégulières à l'atteinte des seuils d'occupation ou de vétusté fixés par le décideur. Il en va de même de la politique de rénovation qui pourrait dépendre, outre des objectifs énergétiques de la réglementation en vigueur, des attentes des usagers ou du niveau de dégradation des biens locatifs.

2.2.2. Valeur verte : valoriser la performance énergétique

Dans MACARON, la valeur verte n'est ni une décision ni une politique publique : c'est une tendance observable. Notre hypothèse dans MACARON est que la valeur verte des bâtiments n'impacte pas directement le taux de vacance des bâtiments du parc, mais son niveau d'attractivité. On a vu dans ces travaux que la valeur verte telle que modélisée a un impact faible, insuffisant pour rentabiliser les investissements numériques du décideur. Par ailleurs la valeur locative dépend de la localisation des bâtiments, mais pas de leur performance énergétique (ni de considérations de type modèle hédonique). On pourrait envisager de creuser un impact direct de la valeur verte sur la valeur locative (les loyers) : dans un contexte où la valeur locative serait un peu plus finement définie sur ces aspects, elle pourrait introduire des variations des loyers en fonction de la valeur verte et participer à la rentabilisation des investissements.

Une autre facette de la valeur verte, modélisée dans MACARON mais non-exploitée dans ces travaux, est la variation de la valeur à la vente des bâtiments (off-land value) au cours du temps, et des rénovations (en fonction de la valeur verte). La prise en compte des entrées (achats, constructions) et sorties de parc (démolitions, ventes) qui ont justifié cet aspect de la modélisation permettrait d'exploiter le modèle pour évaluer l'intérêt des rénovations (en termes de création de valeur sur le parc et de rentabilisation des investissements) au regard d'autres options de démolition-reconstruction. Par ailleurs cette complexification du processus de décision pour les investissements énergétiques peut s'accompagner de développements spécifiques autour de disciplines telles que l'économie circulaire, vecteur de performance environnementale du renouvellement urbain (voire section sur les évolutions potentielles de MACARON).

2.2.3. Renforcement des contraintes financières

La contrainte d'une trésorerie minimale permanente pourrait faire partie des paramètres de décision (« *quel MESO CashFlow min acceptable pour autoriser les travaux ? Si pas de marge suffisante, abandon* ») : quel Rsupply max (le nombre de rénovations sélectionnées annuellement) l'organisation peut-elle financièrement supporter ou quelle pression financière (report des opérations) engendre-t-il ? Des variables telles que le niveau des impayés, la vacance et la valeur verte (voir supra) pourraient alimenter la boucle de rétroaction. Dans des développements ultérieurs, tester la sensibilité du modèle à cette contrainte de trésorerie minimale permettrait de contribuer à l'étude des leviers de massification des opérations de rénovation dans un système multi-agents.

3. Évolution du modèle : MACARON 2

L'élargissement de notre problématique aux échelles NANO et MACRO permettra, dans cette section, de mettre en perspective les hypothèses prises dans MACARON pour proposer des axes d'évolution du modèle vers sa version Hyper Complexe.

3.1. Pistes de modélisation du niveau NANO : l'usager

Le niveau NANO tel qu'envisagé dans nos propres développements a vocation à fournir un socle de réflexion pour la prise en compte des comportements individuels et collectifs des usagers face aux dynamiques de numérisation et de rénovation des espaces occupés. La mise en lumière des rôles et impacts de l'usager-occupant dans le processus de transition énergétique et numérique du parc pourrait être centrée, dans notre problématique, sur la création de scénarios de gestion participative de l'information (lien avec MESO), l'exploitation de scénarios de consommation des ménages (lien avec MICRO) ou encore l'identification des dynamiques socio-urbaines liées au confort et à l'amélioration du cadre de vie (lien avec MACRO).

Dans notre vision systémique du rôle de l'usager dans la transition numergétique du parc bâti existant, on identifie pour chaque sous-modèle plusieurs axes de développements potentiels.

Le sous-modèle NAPE, dédié à la modélisation de l'impact des occupants sur la performance énergétique des bâtiments, pourrait ainsi être approché par :

- L'évaluation de la performance énergétique des unités bâties (logements, ou autres si hétérogénéisation du parc) ;
- L'évolution des courbes de consommations énergétiques des occupants (ménages, ou autres si hétérogénéisation du parc) ;
- L'évaluation du niveau de précarité énergétique des ménages ;
- La boucle causale entre occupation et vétusté des constructions ;
- L'évaluation de l'effet rebond des rénovations ;
- Le lien entre dynamiques urbaines, comportements individuels (type vandalisme) et vétusté des constructions.

Le sous-modèle NACF, dédié à l'évaluation microéconomique de la création de valeur sur le parc et de la pertinence des investissements locaux, pourrait s'intéresser à l'évolution de la capacité financière du décideur soumis à un niveau de contrainte alimenté des spécificités des usagers (situation socio-économique). NACF pourrait alors intégrer des problématiques telles que :

- Revenus des ménages, précarité énergétique et risques financiers engendrés par les impayés. Les défauts de paiement des loyers sont monnaie courante en gestion locative. Ceux-ci ont un impact majeur sur la capacité financière du gestionnaire exploitant et sa stratégie d'action sur le parc ;
- Lien entre la vétusté (dégradation, non-conformité) des bâtiments, la facture énergétique et l'attractivité pour les usagers (soumis à contrainte de moyens financiers) ;
- Complexification du processus de décision pour les rénovations : l'endogénéisation de Rsupply (le nombre de rénovations sélectionnées annuellement) pourrait intégrer une boucle de rétroaction traduisant un raisonnement complexe de l'usager. La décision de rénover intégrerait alors de nouvelles contraintes de faisabilité des opérations, telles que :
 - la capacité de relogement pendant les travaux en site non-occupé,

- la gêne occasionnée ou à prévoir lors de travaux en site occupé,
- l'acceptabilité, pour l'usager, d'une éventuelle augmentation de la valeur locative suite aux rénovations et l'impact sur la rentabilisation prévisible des travaux,
- la priorisation des rénovations : mesure des risques financiers, de la diminution de la précarité énergétique, impact de la facture énergétique sur l'attractivité des bâtiments.

Le sous-modèle NARH a vocation à mettre en lumière les possibles interactions décideurs-occupants dans la quête d'amélioration du parc. Des développements pourraient être envisagés sur les aspects sociaux-techniques suivants :

- L'évaluation de l'impact des stratégies de maintenance, de rénovation et de numérisation des bâtiments sur le confort ressenti par les usagers ;
- La boucle causale qualité des travaux-vétusté de l'existant-confort-attractivité pour l'usager ;
- La mesure de l'impact de la sensibilisation des usagers aux bonnes pratiques numériques et écologiques sur les courbes de consommation, la vétusté des constructions et l'appréciation du confort ressenti par les usagers ;
- La mesure de l'impact de la mise en place de chartes ou protocoles de gestion participative sur la sensibilisation des occupants aux bonnes pratiques numériques et écologiques.

Enfin le sous-modèle NADN concerne principalement les problématiques de la gestion participative de la donnée et de la diversification des coûts-avantages du BIM pour la GMAO et la GTB. Dans ce sous-modèle pourraient être développés :

- La diversification des technologies numériques (internet des objets, réalité virtuelle, réalité augmentée), leur intérêt et leur implication dans les processus BIM
- En lien avec ces technologies, la distinction des coûts-avantages spécifiques du BIM et des outils numériques (visualisation 3D, géolocalisation, évaluation des surfaces, de la vacance...) pour des missions impactées par la gestion numérique du parc du type :
 - Promotion immobilière,
 - Gestion locative,
 - Détection (de dysfonctionnements techniques),
 - Visites et interventions sur site...
- Digital gap : faut-il former les individus à la GTB numérique ?
- Rôle de l'accès à la donnée, à la connaissance, à la visualisation sur la modification des flux opérationnels et de la structure du modèle en gestion de données
- Impact de la gestion participative des données sur la qualité et la disponibilité des connaissances : possible construction progressive du parc type « open building map ⁸⁹ » ?

3.2. Pistes de modélisation du niveau MACRO : l'ensemble urbain

Le niveau MACRO fonde la modélisation des performances énergétiques du parc urbain complexe soumis à une stratégie numergétique. Ce niveau implique des décideurs multiples regroupant des acteurs publics et privés et la diversification des objets techniques, désormais hétérogènes, dont ils ont respectivement la charge. Ici les enjeux et objectifs de chacun s'articulent autour du SI collaboratif BIM dans une recherche de performance énergétique, financière et informationnelle du parc urbain. On identifie plusieurs axes de développement dédiés à la montée en échelle de MACARON en alignement avec les présents travaux, dont par exemple la compétitivité des organisations (lien avec MESO), l'incitation à la transition numergétique de l'existant (lien avec MICRO) et la prise en compte des comportements individuels dans la définition des objectifs numergétiques stratégiques (lien avec NANO).

Dans notre vision systémique de la transition numergétique du parc urbain existant, on identifie pour chaque sous-modèle plusieurs axes de développements potentiels.

Le sous-modèle MAPE est dédié à la modélisation du paysage réglementaire en matière de politique énergétique et environnementale. De nombreux aspects peuvent être considérés dans les développements de ce sous-modèle, parmi lesquels :

⁸⁹ En référence à Open Street Map.

- L'endogénéisation des objectifs réglementaires, c'est-à-dire la création d'une boucle de rétroaction causale entre les effets produits par la réglementation thermique/environnementale et TEPCV (performance énergétique des bâtiments) et les objectifs visés par celles-ci : la réglementation s'« adapte » aux conditions de terrain en « ajustant » les objectifs aux résultats préalablement obtenus. Dans cette hypothèse les informations produites par les individus en NANO, les objets techniques en MICRO et les organisations en MESO sont utiles pour interpréter les tendances de niche et de régime dans l'objectivation des politiques publiques.
- La modélisation de scénarios énergétiques et environnementaux destinés à explorer l'impact de la disparition progressive des ressources en énergies fossiles ou du changement climatique. Ces questions ont à voir avec une approche prospective de l'évolution à long-terme de la résilience de nos constructions.
- L'élargissement du modèle à d'autres aspects thématiques de la performance énergétique et environnementale, comme par exemple l'évaluation de l'empreinte carbone des bâtiments réels et numérique et la modélisation de scénarios de politiques publiques relative à la décarbonation des parcs, ou la modélisation des dynamiques de déconstruction/reconstruction et l'évaluation de l'impact environnemental de l'économie circulaire des rénovations.

Le sous-modèle MACF autorise des domaines d'investigation très vastes dans MACARON en fonction des orientations désignées de l'exploitation modèle. On souligne deux enjeux pour les développements de ce sous-modèle : le premier concerne l'exploration de l'impact de la stratégie numergétique des organisations sur leur compétitivité, locale ou globale ; le second adresse les leviers de réorientation économique des parcs, organisations, compétences et activités obsolètes potentiellement adressés par les pouvoirs publics. Ces problématiques pourraient s'exprimer dans MACARON par la prise en compte d'aspects tels que :

- L'analyse des coûts-avantages associés à l'usage de technologies complémentaires au BIM (internet des objets, automatisation de la collection des données, réalité virtuelle et augmentée)
- La modélisation d'une boucle causale entre la performance de la stratégie énergétique et environnementale et l'image de marque des organisations. L'image d'une organisation a d'importantes répercussions potentielles sur sa compétitivité et son attractivité pour les usagers du parc particulièrement dans des missions comme la promotion immobilière. C'est une cible possible des avantages des technologies évoquées dans le point ci-dessus.
- La gestion des entrées/sorties du parc par des constructions ou des achats d'une part, des déconstructions ou des ventes d'autre part. Une telle gestion serait liée à la notion de valeur verte d'une part, aux problématiques de renouvellement urbain et d'économie circulaire d'autre part.
- Le renforcement des causalités entre performance énergétique et économique des organisations par l'identification de problématiques connexes telles que la revalorisation et la réorientation des espaces vétustes ou l'intérêt de l'économie circulaire dans les dynamiques de rénovation. À cela s'ajoute l'analyse du rôle du numérique dans l'efficacité de telles stratégies de gestion (exemple : fonctionnalité BIM de métrage, quels avantages supplémentaires cela permet-il en économie circulaire ?).
- La modélisation de l'évolution des aides publiques et des systèmes d'incitation pour la numérisation et la rénovation des espaces servirait utilement l'analyse des conditions de faisabilité financière de la transition numergétique. Cette question demande l'approfondissement de problématiques spécifiques comme les conditions de solvabilité de l'organisation. Cela introduirait la capacité d'emprunt, également fondamentale dans la caractérisation de la capacité financière du décideur pour les investissements numergétiques.
- L'introduction d'éléments macroéconomiques pour adresser la question de la transition numergétique et des rénovations urbaines soit à des échelles supérieures (nationale, supranationale...) soit à la rencontre d'autres secteurs industriels et techniques par exemple.

Le sous-modèle MARH reproduit notre vision des processus opérationnels et décisionnels dans une structure multi-agents. MARH est le lieu de rencontre des politiques individuelles des organisations. Ainsi des développements faisant émerger des tendances de régime sur la mutation des filières et des organisations pourraient concerner :

- L'analyse et la modélisation des divergences des stratégies, d'objectifs et de contraintes numergétiques, de gestion de la non-qualité pour explorer l'impact sur les processus

collaboratifs et la performance résultante des projets de rénovation urbaine (qualité, attractivité etc...).

- L'obsolescence des organisations, des savoirs et la compétitivité locale/globale, ainsi que les stratégies de recrutement et de formation BIM, incluant la formation continue/formation initiale.
- Les compétences BIM multi-agents et la diffusion du savoir BIM au travers d'initiatives telles que PTNB et Plan BIM 2022.
- À des échelles supérieures, l'émergence de nouveaux secteurs d'activités et de nouvelles compétences.

Le sous-modèle MADN pourrait intégrer :

- Les initiatives publiques de type PTNB/Charte BIM 2022 endogènes.
- La question du BIM multi-agents, les gains collaboratifs qu'il laisse entrevoir et la problématique de l'interopérabilité.
- La question des données urbaines (CIM), la gestion globalisée de l'information, et des problématiques systémiques telles que la mémorisation. Pour s'aligner avec de futurs développements, l'expérience BIM pourrait constituer une brique « boîte noire » potentiellement alimentée par des outils d'évaluation de la maturité spécifiques (voir Succar, Forgues et BIMetric).

4. Mise à profit et produits potentiels de MACARON

MACARON a montré dans ces travaux sa capacité à repousser les limites de l'évaluation systémique de la cohérence des politiques énergétique et numérique. Deux angles majeurs d'exploitation du modèle ont été identifiés comme produits potentiels de notre recherche : MACARON PP pour la simulation et l'analyse des Politiques Publiques et MACARON ST pour l'aide à la définition des Stratégies de Transition numergétique des organisations.

4.1. MACARON PP : analyse des Politiques Publiques

On voit ainsi que la modélisation proposée par MACARON pourrait inspirer le développement à usage de l'autorité publique d'outils macroscopiques de quantification des impacts de stratégies réglementaires. Parmi les nombreux axes de travail envisageables dans ce sens, nous avons recensé dans nos travaux les orientations suivantes :

- Objectifs réglementaires de type Facteur4 (-75% des consommations énergétiques mesurées en 1990 avant 2050).
- Aides publiques et systèmes d'incitation pour la numérisation et la rénovation des espaces. La conjonction d'aides publiques et de compensations sur les loyers est ici nécessaire pour rendre les rénovations intéressantes. Quel montant d'aides publiques faudrait-il injecter pour y parvenir ? Sous quelle forme ?
- Surcoûts de la proactivité et de l'anticipation technologique.
- Scénarios énergétiques et scénarios environnementaux, intégrant tout à la fois des crises, des ruptures et des politiques volontaristes ou au contraire laxistes.
- Scénarios économiques
- À des échelles supérieures, aménagement des espaces, redynamisation des territoires...

4.2. MACARON ST : évaluation des Stratégies de Transition numergétique

L'exploitation de MACARON au chapitre précédent a montré les possibilités qu'il offre de mise en place et d'analyse de scénarios combinant un ensemble d'hypothèses touchant aux variables tant endogènes qu'exogènes. MACARON pourrait ainsi aider les gestionnaires maîtres d'ouvrage – comme l'ensemble des acteurs du système – à élaborer et à évaluer des stratégies de transition numergétique de leur organisation. Les pistes de développement d'un tel outil d'AMO pourraient être les suivantes :

- Analyse du cycle de vie (ACV) des données. Cette analyse de l'ensemble de la chaîne de génération – traitement – maintien – fiabilisation des données pourrait être conduite en

s'intéressant simultanément à différentes dimensions : économique (coûts financiers induits), humaine (temps passés à la gestion des données et des documents de référence), énergétique, environnementale (empreinte de la transformation numérique)...

- Politique interne de gestion des emplois et des compétences : stratégies de formation et de développement des qualifications, scénarios de recrutement, règles de décision en phase de transition...
- Schémas organisationnels confrontés aux nécessités de la transition numergétique, selon la taille, la structure et le domaine d'intervention de l'organisation ;
- Sensibilité des stratégies de transition aux variables exogènes représentatives de politiques publiques, de conjonctures macroscopiques ou d'aléas majeurs ;
- Impact de choix internes fondamentaux sur l'efficacité et la pérennité des missions de l'organisation : politique RSE ambitieuse, décarbonation des processus...

4.3. À plus long terme

La DSC offre de multiples pistes de modélisation qui pourraient transformer l'approche première mise en œuvre ici. Ces pistes permettraient notamment de développer une vision industrielle de l'activité de gestion-exploitation des parcs immobiliers et, plus généralement, des processus d'aménagement et de requalifications urbains : modélisation de type « supply chain » appliquée à des objets techniques construits et rénovés (bâtiments, équipements urbains...), modélisation mixte continue-discrète (prise en compte d'aléas techniques, financiers, humains, administratifs ou organisationnels, approche probabiliste de dysfonctionnements...).

Par ailleurs, la littérature scientifique montre des exemples d'expérimentation de développement de modèles en dynamique des systèmes complexes, dans différents environnements dont Vensim, mettant en œuvre des techniques telles que la logique floue ou l'optimisation multicritère. Si ces implantations apparaissent pour l'heure lourdes et ardues à déployer dans les cas qui nous occupent, elles offrent des pistes d'exploration intéressantes à considérer pour pallier l'incomplétude des données, développer l'apprentissage des algorithmes ou sélectionner les meilleures options stratégiques grâce à des métaheuristiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahzahar, N., Karim, N.A., Hassan, S.H., Eman, J., 2011. A Study of Contribution Factors to Building Failures and Defects in Construction Industry. *Procedia Engineering* 20, 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.162>
- Aïssani, A., Chateauneuf, A., Fontaine, J.-P., Audebert, Ph., 2016. Quantification of workmanship insulation defects and their impact on the thermal performance of building facades. *Applied Energy* 165, 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.040>
- Alencastro, J., Fuertes, A., de Wilde, P., 2018. The relationship between quality defects and the thermal performance of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 883–894. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.029>
- Barlish, K., Sullivan, K., 2012. How to measure the benefits of BIM — A case study approach. *Automation in Construction* 24, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008>
- Beers, P.J., Boshuizen, H.P.A., Kirschner, P.A., Gijssels, W.H., 2006. Common Ground, Complex Problems and Decision Making. *Group Decision and Negotiation* 15, 529–556. <https://doi.org/10.1007/s10726-006-9030-1>
- Bérard, C., 2010. Le processus de décision dans les systèmes complexes : une analyse d’une intervention systémique. Université Paris-Dauphine, Université du Québec à Montréal.
- Bolwig, S., Bazbauers, G., Klitkou, A., Lund, P.D., Blumberga, A., Blumberga, D., 2018. Modelling energy transitions pathways 29.
- Bougrain, F., 2018. Coûts et gains associés au BIM. CSTB.
- Bousdekis, A., Magoutas, B., Apostolou, D., Mentzas, G., 2015. A proactive decision making framework for condition-based maintenance. *Industrial Management & Data Systems* 115, 1225–1250. <https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2015-0071>
- Branger, F., 2015. Modélisation de la consommation d’énergie dans le secteur résidentiel français 84.
- Cavka, H.B., Staub-French, S., Poirier, E.A., 2017. Developing owner information requirements for BIM-enabled project delivery and asset management. *Automation in Construction* 83, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.006>
- Celnik, O., Lebègue, E., Nagy, G., 2015. BIM et maquette numérique pour l’architecture, le bâtiment et la construction, Eyrolles architecture. Eyrolles, CSTB.
- CEREMA, (Centre d’Études et d’expertise sur les Risques l’Environnement la Mobilité et l’Aménagement), ADEME, (Agence De l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie), 2017. Bâtiments démonstrateurs à basse consommation énergie - Enseignements de 119 constructions et rénovations du programme PREBAT – 2012-2016 304.
- Chu, Strand, Fjelland, 2003. Theories of complex systems.
- Club Solvabilité 2, 2015. Les 10 clefs de la qualité des données. PwC.
- Cluzel, G., 2006. Rentabilité d’un système d’information. Approche théorique. Techniques de l’ingénieur. L’Entreprise industrielle.

- Corbel, J.-C., 2019. Management de projet: fondamentaux, méthodes, outils : cahier couleur, manager un projet en 15 étapes. Eyrolles, Paris.
- Cuménal, D., 2014. Obsolescence des organisations : une approche par la modélisation en Dynamique des Systèmes 12.
- de Lange, P., Bähre, B., Finetti-Imhof, C., Klamma, R., Oppermann, L., 2017. Socio-technical Challenges in the Digital Gap between Building Information Modeling and Industry 4.0 14.
- De Maestri, A., 2017. Premiers pas en BIM, Blanche BTP. Eyrolles, AFNOR.
- DINAMIC, (Association Développement de l'Information Notariale et Analyse du Marché Immobilier et de la Conjoncture), 2015. La valeur verte des logements d'après les bases Notariales BIEN et PERVAL.
- Donnadieu, G., Durand, D., Neel, D., Nunez, E., Saint-Paul, L., 2003. L'Approche Systémique : de quoi s'agit-il ? (Synthèse des travaux du Groupe AFSCET " Diffusion de la pensée systémique"). AFSCET (Association Française de Science des Systèmes Cybernétiques Cognitifs Et Techniques).
- Elsawah, S., Pierce, S.A., Hamilton, S.H., van Delden, H., Haase, D., Elmahdi, A., Jakeman, A.J., 2017. An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. *Environmental Modelling & Software* 93, 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.001>
- Epstein, R., 2012. ANRU: mission accomplie?, in: À Quoi Sert La Rénovation Urbaine? Presses Universitaires de France, pp. 51–97.
- FEDENE, SYNTEC-INGÉNIERIE, 2016. Réussir le BIM pour l'Exploitation.
- Feldman, S., Sherman, C., 2001. The High Cost of Not Finding Information 10.
- FFB, (Fédération Française du Bâtiment), 2019. Le bâtiment en chiffres 2018 [WWW Document]. <https://ffbatiment.fr>. URL https://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/le-batiment-et-vous/en_chiffres/les-chiffres-en-france.html
- FIDJI, (Association Format d'Inter-Échanges de Données Juridiques et Immobilières), Mazars, 2011. Vos partenaires parlent-ils votre langage ?
- Ford, D., Sterman, J., 1998. Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models. *System Dynamics Review* 14, Issue 4, 309–340.
- Forrester, J.W., 1989. The Beginning of System Dynamics. Banquet Talk at the international meeting of the System Dynamics Society Stuttgart, Germany July 13 16.
- Forrester, J.W., 1969. Urban dynamics. Cambridge, Mass., M.I.T. Press.
- Forrester, J.W., Senge, P.M., 1980. Test for building confidence in system dynamics models. *TIMS Studies in the Management Sciences* 14 209–228.
- Geels, F.W., Schot, J., 2007. Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy* 36, 399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Geels, F.W., Sovacool, B.K., Schwanen, T., Sorrell, S., 2017. The Socio-Technical Dynamics of Low-Carbon Transitions. *Joule* 1, 463–479. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.018>
- Ghaffarianhoseini, Ali, Tookey, J., Ghaffarianhoseini, Amirhosein, Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O., Raahemifar, K., 2017. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 1046–1053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
- Gimenez, L., Robert, S., Suard, F., Zreik, K., 2016. Automatic reconstruction of 3D building models from scanned 2D floor plans. *Automation in Construction* 63, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.008>
- Gobin, C., 2014. Le bâtiment comme système. *Techniques de l'Ingénieur* 22.
- Gollier, C., 2005. Quel taux d'actualisation pour quel avenir ? *Revue française d'économie* 19, 59–81. <https://doi.org/10.3406/rfec.2005.1560>

- Gonod, F., Loinger, G., 1994. Méthodologie de la prospective régionale: rapport final Prospective et aménagement du territoire 335.
- Gonod, P., 1996. Dynamique des systèmes et méthodes prospectives. *Futuribles International*.
- Han, S., Love, P., Peña-Mora, F., 2013. A system dynamics model for assessing the impacts of design errors in construction projects. *Mathematical and Computer Modelling* 57, 2044–2053. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.039>
- Holtz, G., Alkemade, F., de Haan, F., Köhler, J., Trutnevyte, E., Luthe, T., Halbe, J., Papachristos, G., Chappin, E., Kwakkel, J., Ruutu, S., 2015. Prospects of modelling societal transitions: Position paper of an emerging community. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 17, 41–58. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.05.006>
- Holzer, D., 2011. BIM's seven deadly sins. *International Journal of Architectural Computing* 9, 463–480.
- Idt, J., 2009. Le pilotage des projets d'aménagement urbain: entre technique et politique : Une analyse basée sur les cas de Paris, Lille, et Chartres. Université Paris VIII Vincennes-Saint Denis.
- Jensen, P.A., Maslesa, E., 2015. Value based building renovation – A tool for decision-making and evaluation. *Building and Environment* 92, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.008>
- Johansson, P., Linderöth, H.C., Granth, K., 2014. The role of BIM in preventing design errors 10.
- Karsky, M., 2004. Dynamique des systèmes complexes - Concepts et méthodologie. *Techniques de l'ingénieur* 17.
- Kelly (Letcher), R.A., Jakeman, A.J., Barreteau, O., Borsuk, M.E., ElSawah, S., Hamilton, S.H., Henriksen, H.J., Kuikka, S., Maier, H.R., Rizzoli, A.E., van Delden, H., Voinov, A.A., 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling & Software* 47, 159–181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.005>
- Köhler, J., de Haan, F., Holtz, G., Kubeczko, K., Moallemi, E., Papachristos, G., Chappin, E., 2018. Modelling Sustainability Transitions: An Assessment of Approaches and Challenges. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 21. <https://doi.org/10.18564/jasss.3629>
- Le Moigne, J.-L., 1994. Le constructivisme, Collection Communication et complexité. ESF, Paris.
- Lee, G., Park, H.K., Won, J., 2012. D3 City project — Economic impact of BIM-assisted design validation. *Automation in Construction* 22, 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.12.003>
- Lee, Q., 2012. Learning & Experience Curves In Manufacturing. Strategos, Inc., Kansas City.
- Li, F.G.N., Trutnevyte, E., Strachan, N., 2015. A review of socio-technical energy transition (STET) models. *Technological Forecasting and Social Change* 100, 290–305. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.017>
- Lopez, R., Love, P.E.D., Edwards, D.J., Davis, P.R., 2010. Design Error Classification, Causation, and Prevention in Construction Engineering. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 24, 399–408. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000116](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000116)
- Love, P.E.D., Edwards, D.J., Han, S., Goh, Y.M., 2011. Design error reduction: toward the effective utilization of building information modeling. *Research in Engineering Design* 22, 173–187. <https://doi.org/10.1007/s00163-011-0105-x>
- Love, P.E.D., Edwards, D.J., Smith, J., Walker, D.H.T., 2009. Divergence or Congruence? A Path Model of Rework for Building and Civil Engineering Projects. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 23, 480–488. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000054](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000054)

- Lyons, M.H., Adjali, I., Collings, D., Jensen, K.O., 2003. Complex systems models for strategic decision making. *BT Technology Journal* 21, 18.
- Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., Ledo, L., 2012. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings* 55, 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>
- Machlup, F., Princeton University Press, Mayere, A., Salaün, J.-M., 1993. Économie des connaissances et de l'information. *Réseaux* 11, 109–129. <https://doi.org/10.3406/reso.1993.2308>
- MEEDDAT, (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire), MLV, (Ministère du Logement et de la Ville), 2019. Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1 000 mètres carrés, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants.
- Moinet, N., 2009. De l'information utile à la connaissance stratégique : la dimension communicationnelle de l'intelligence économique. *Communication et organisation* 215–225. <https://doi.org/10.4000/communicationorganisation.855>
- Molines, N., 2007. Analyse de la valeur sociale des composantes environnementales d'un territoire soumis à l'introduction d'une nouvelle infrastructure linéaire: apport des SIG et des méthodes multicritères. SAGEO.
- Moncada, J.A., Park Lee, E.H., Nava Guerrero, G.D.C., Okur, O., Chakraborty, S.T., Lukszo, Z., 2017. Complex Systems Engineering: designing in sociotechnical systems for the energy transition. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web* 3, 152762. <https://doi.org/10.4108/eai.11-7-2017.152762>
- Morin, E., 1990. Introduction à la pensée complexe. Paris : Ed. Du Seuil.
- MTES, (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire), 2012. Base de données Pégase (Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie).
- Papachristos, G., 2019. System dynamics modelling and simulation for sociotechnical transitions research. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 31, 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.10.001>
- Papachristos, G., 2018. A mechanism based transition research methodology: Bridging analytical approaches. *Futures* 98, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.02.006>
- Pirotton, G., 2005. Introduction à la systémique 16.
- Rajerison, M., 2017. Concepts et indicateurs de la qualité des données géographiques - Du bon usage de la norme 19157.
- Rosnay, J. de, 1979. The Macroscopic. A new world scientific system, Harper & Row. ed. New York, Hagerstown, San Francisco, London.
- Rosnay, J. de, 1975. Le Macroscopic. Vers une vision globale, Seuil. ed. Paris.
- Shang, Z., Shen, Z., 2014. Critical Success Factors (CSFs) of BIM Implementation for Collaboration based on System Analysis, in: *Computing in Civil and Building Engineering (2014)*. Presented at the 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, American Society of Civil Engineers, Orlando, Florida, United States, pp. 1441–1448. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.179>
- Sidler, O., n.d. La rénovation thermique des bâtiments en France Enjeux et stratégie 48.
- Soyer, I., Dixneuf, H., Segrétain, J.-P., 2014. La maintenance des bâtiments en 100 fiches pratiques. Éd. Le Moniteur, Paris.
- Stegnar, G., Cerovšek, T., 2019. Information needs for progressive BIM methodology supporting the holistic energy renovation of office buildings. *Energy* 173, 317–331. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.087>
- Sterman, J.D., 2009. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world, Nachdr. ed. Irwin/McGraw-Hill, Boston.

- Subra, P., 2008. L'aménagement, une question géopolitique! *Hérodote* 130, 222. <https://doi.org/10.3917/her.130.0222>
- Succar, B., Kassem, M., 2015. Macro-BIM adoption: Conceptual structures. *Automation in Construction* 57, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.018>
- Tabourdeau, A., Debizet, G., 2017. Concilier ressources *in situ* et grands réseaux : une lecture des proximités par la notion de nœud socio-énergétique. *Flux* 109–110, 87. <https://doi.org/10.3917/flux1.109.0087>
- Tenière-Buchot, P.F., 1989. L'ABC du pouvoir: agir, bâtir, conquérir... et sourire : analyse structurelle et tablier des pouvoirs : méthode et pratique. Éditions d'Organisation, Paris.
- Thion, B., 1994. Valeur, prix et méthodes d'évaluation en immobilier 26.
- Thomsen, A., van der Flier, K., 2011. Understanding obsolescence: a conceptual model for buildings. *Building Research & Information* 39, 352–362. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.576328>
- Thorel, M., 2014. Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale. Université de Grenoble.
- Vicente, J., 2003. Économie de la connaissance. Cours de l'Institut d'Études Politiques de Toulouse.
- Volk, R., Stengel, J., Schultmann, F., 2014. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction* 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Von Bertalanffy, L., 1968. General System Theory. George Braziller, Inc., New York.
- Zhang, X., Wu, Y., Shen, L., Skitmore, M., 2014. A prototype system dynamic model for assessing the sustainability of construction projects. *International Journal of Project Management* 32, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.01.009>
- Zheng, H.W., Shen, G.Q., Wang, H., 2014. A review of recent studies on sustainable urban renewal. *Habitat International* 41, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2013.08.006>

ANNEXES

ANNEXE 1

VALEUR VERTE : ADAPTATION DE L'ETUDE (DINAMIC, 2015).....	270
1. LA VALEUR VERTE DES LOGEMENTS D'APRES LES BASES NOTARIALES BIEN ET PERVAL.....	270
2. ADAPTATION PERSONNELLE : <i>ATTRACTIVENESS(B,T)</i> , <i>GREEN VALUE(B,T)</i>	271

ANNEXE 2

CARACTERISTIQUES DES MODELES DE DONNEES BIM.....	272
1. PRIX D'ACQUISITION/MODELISATION DES DONNEES DU PARC	272
2. UTILITE DES LOD : EFFORT RELATIF ET TAUX D'ADEQUATION AUX ACTIVITES	273
3. NOMBRE D'ATTRIBUTS PAR LOD ET OBSOLESCENCE DES DONNEES.....	273
4. SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES LOD	274

ANNEXE 3

MODELE DE COUTS DE MACARON.....	275
1. DIAGRAMME DE FLUX	275
2. NOMENCLATURE	276

ANNEXE 4

PROFILS DES CONSOMMATIONS UNITAIRES AU SEIN DU PARC.....	277
1. RAPPEL DES HYPOTHESES INITIALES.....	277
2. PP A : REPARTITION LINEAIRE.....	277
3. PP B : REPARTITION EXPONENTIELLE	277
4. PP C : REPARTITION LOGARITHMIQUE	278
5. PP D : REPARTITION SIGMOÏDALE.....	278
6. PP E : DONNEES DU PARC SOCIAL	279

ANNEXE 1

VALEUR VERTE

ADAPTATION DE L'ETUDE (DINAMIC, 2015)

1. La valeur verte des logements d'après les bases notariales BIEN et PERVAL

Extrait (DINAMIC 2015) : « La valeur verte mesurée dans cette étude représente la plus-value à la revente liée à une meilleure performance énergétique du logement. Ce n'est toutefois qu'une des composantes de la performance environnementale du logement. Les Bases de données PERVAL (transactions de province) et BIEN (transactions franciliennes) sont alimentées sur la base du volontariat par les Notaires, leur taux de couverture est respectivement de 55% et 75% des transactions réellement intervenues. »

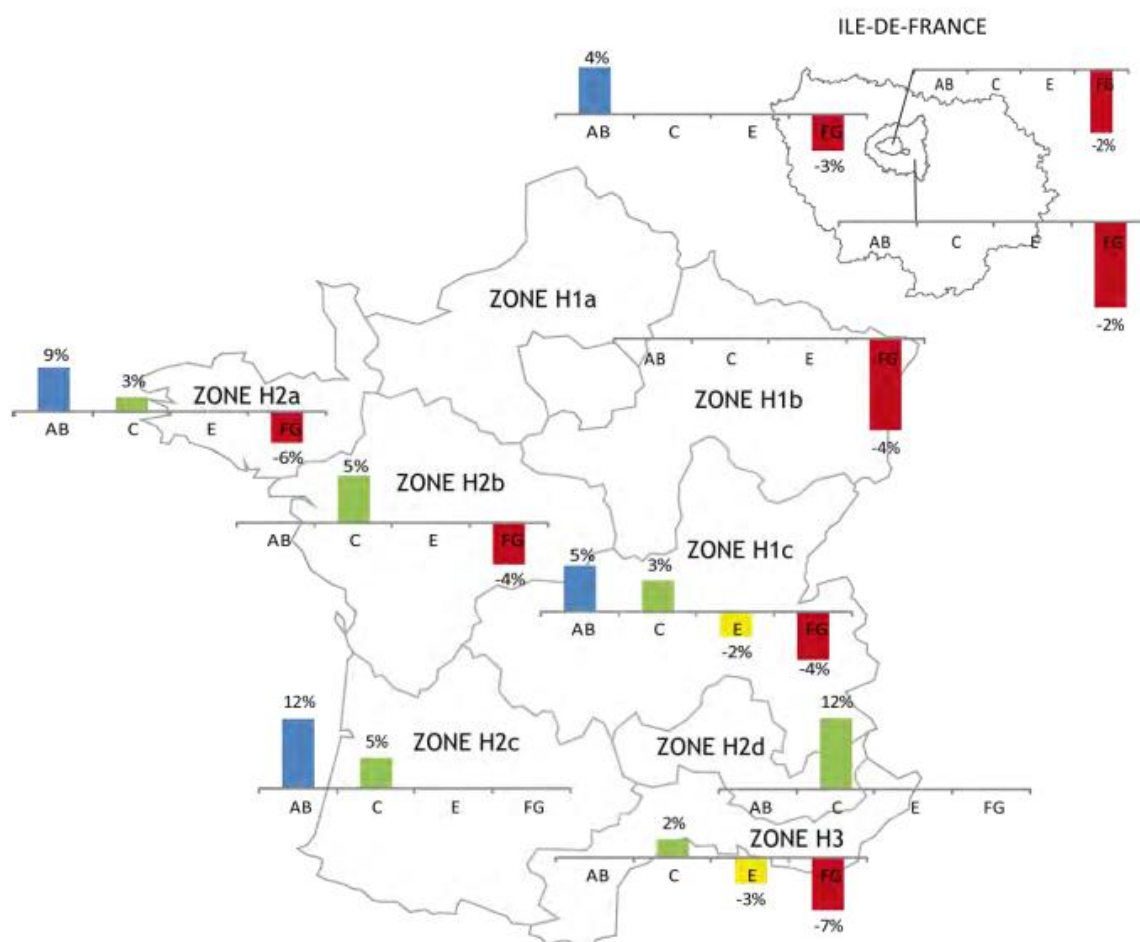


Figure 131. Estimation de l'impact de l'étiquette énergie (variation du prix en % par rapport à un appartement d'étiquette D – période 2012-2013, France métropolitaine). Carte extraite de (DINAMIC, 2015)

2. Adaptation personnelle : $attractiveness(b,t)$, $green\ value(b,t)$

On consolide les résultats à l'échelle des zones thermiques en calculant la moyenne de l'écart relatif pour chaque classe.

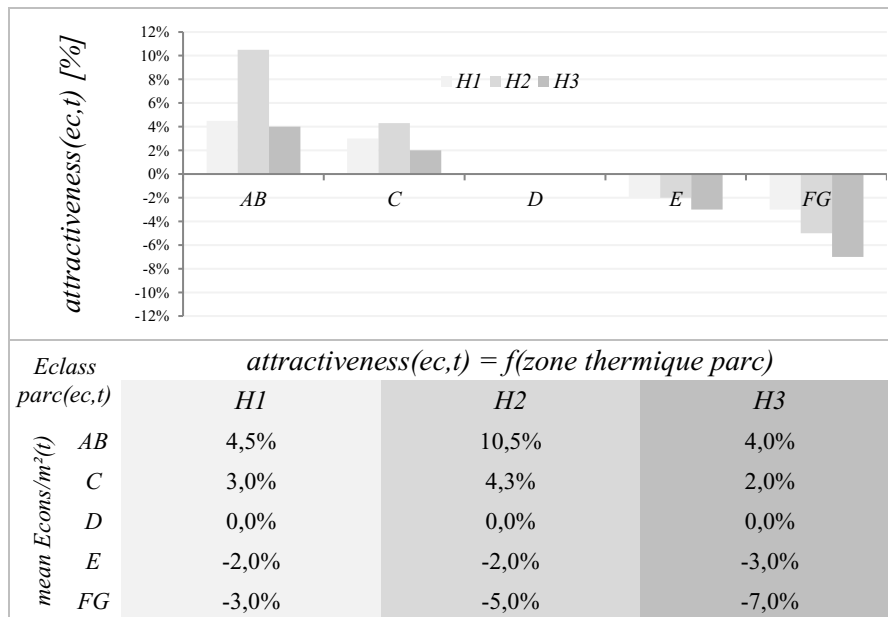


Figure 132. Coefficients d'attractivité appliqués dans MACARON

En mesurant l'écart relatif du coefficient d'attractivité d'une classe à l'autre, on en déduit le coefficient d'évolution de la valeur hors-foncier pondérée :

Ex : $*green\ value(b,t) = -(1-(AB/C)) = -1(-(-0,045/0,03)) = +1,5\%$

Table 72. Coefficient de variation de la valeur hors foncier du bâtiment rénové par saut de classe et zone thermique : $green\ value(b,t)$

GVZ1 matrix						GVZ2 matrix						GVZ3 matrix					
H1	AB	C	D	E	FG	H2	AB	C	D	E	FG	H3	AB	C	D	E	FG
AB	0,0%	-1,4%	-4,3%	-6,2%	-7,2%	AB	0,0%	-5,6%	-9,5%	11,3%	14,0%	AB	0,0%	-1,9%	-3,8%	-6,7%	10,6%
C	1,5%*	0,0%	-2,9%	-4,9%	-5,8%	C	5,9%	0,0%	-4,2%	-6,1%	-8,9%	C	2,0%	0,0%	-2,0%	-4,9%	-8,8%
D	4,5%	3,0%	0,0%	-2,0%	-3,0%	D	10,5%	4,3%	0,0%	-2,0%	-5,0%	D	4,0%	2,0%	0,0%	-3,0%	-7,0%
E	6,6%	5,1%	2,0%	0,0%	-1,0%	E	12,8%	6,5%	2,0%	0,0%	-3,1%	E	7,2%	5,2%	3,1%	0,0%	-4,1%
FG	7,7%	6,2%	3,1%	1,0%	0,0%	FG	16,3%	9,8%	5,3%	3,2%	0,0%	FG	11,8%	9,7%	7,5%	4,3%	0,0%

ANNEXE 2

CARACTERISTIQUES DES MODELES DE DONNEES BIM

1. Prix d'acquisition/modélisation des données du parc

On s'appuie sur des prix issus d'une base de données (confidentielle) du CSTB. On établit la moyenne de ces prix par LOD, et par poste : acquisition des données, modélisation BIM. Les prix d'acquisition ne varient pas en fonction du LOD. On obtient le prix moyen total d'acquisition-modélisation par unité de surface de bâtiment.

Table 73. Prix/m² moyen de modélisation de différents LOD.

LOD	Prix/m ² moyen modélisation (€/m ²)	Prix/m ² moyen acquisition (€/m ²)	Prix/m ² moyen total (€/m ²)
LOD100	0,77	1,40	2,17
LOD200	2,19	1,40	3,59
LOD300	6,19	1,40	7,59
LOD400	17,52	1,40	18,92
LOD500	49,56	1,40	50,96

Afin de disposer d'une relation entre niveau de LOD et coût unitaire, on choisit d'approcher ces valeurs par une loi exponentielle dont l'expression est présentée dans la figure ci-dessous. Cette loi permet de bien approcher les valeurs constatées entre LOD100 et LOD500, valeurs les plus intéressantes dans une démarche de numérisation d'un parc existant. Les différentes valeurs issues de la base de prix constatés devront naturellement faire l'objet d'une consolidation.

On utilise la tendance obtenue pour ajuster notre base de prix.

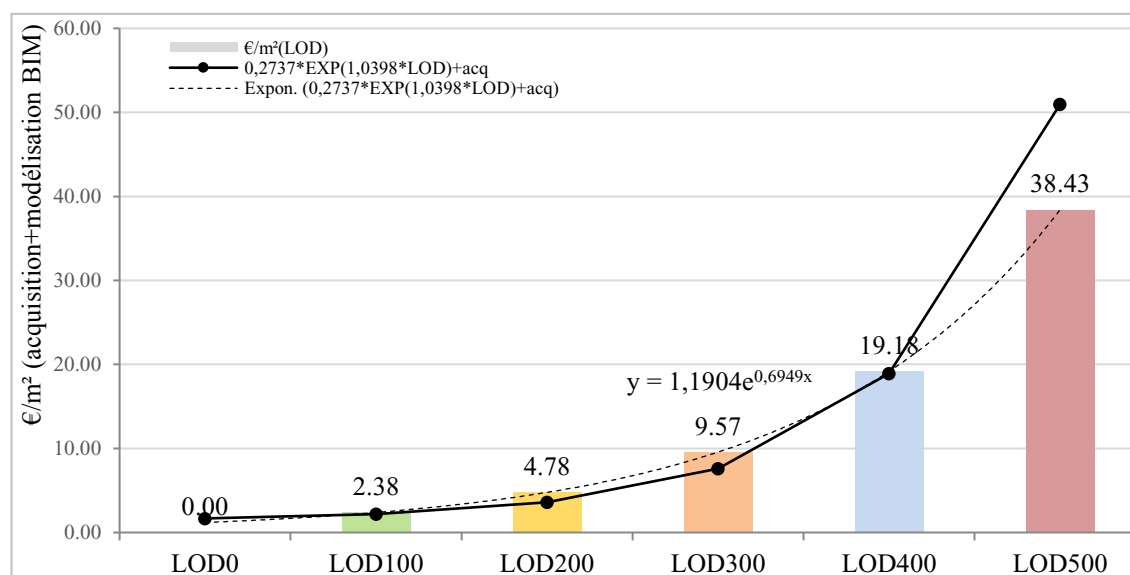


Figure 133. Courbe de tendance de prix pour différents LOD (acquisition comprise).

2. Utilité des LOD : effort relatif et taux d'adéquation aux activités

On en déduit un effort relatif associé à chaque LOD. Hypothèse de modélisation : le taux d'adéquation d'un LOD connaît une dynamique inverse de celle de l'effort relatif (voir Table 74 ci-dessous). On considère ici que le plus petit effort permet le meilleur « rendement » en termes d'adéquation. Exemple : le LOD100 contient 52% (des fonctionnalités et données) utiles à la gestion de patrimoine avec seulement 12% de contenus de données (ce sont les données les plus utiles : géolocalisation etc.). Le taux d'adéquation du LOD aux activités de GPI nous sert ensuite de base pour calculer la proportion de chaque LOD dans un modèle BIM. Celui-ci permettra de quantifier les volumes de données, en nombre d'attributs contenus dans chaque LOD.

Proportion des LOD = taux d'adéquation/(somme des taux d'adéquation)

Table 74. Coût de construction maquette et effort relatif par LOD.

LOD	Lissage prix/m ² moyen total [€/m ²]	Effort relatif [Ø]	Adéquation aux activités de GPI [Ø]	Proportion des LOD dans une maquette BIM [%]
Sans BIM	0,00	0,00	= 1-effort relatif(LOD500) = 0,00	-
LOD100	2,38	0,03	= 1-effort relatif(LOD400) = 0,52	0,52/4,16 = 12%
LOD200	4,78	0,10	= 1-effort relatif(LOD300) = 0,77	0,77/4,16 = 19%
LOD300	9,57	0,23	= 1-effort relatif(LOD200) = 0,90	0,90/4,16 = 22%
LOD400	19,18	0,48	= 1-effort relatif(LOD300) = 0,97	0,97/4,16 = 23%
LOD500	38,43	1,00	= 1-effort relatif(LOD0) = 1,00	1,00/4,16 = 24%

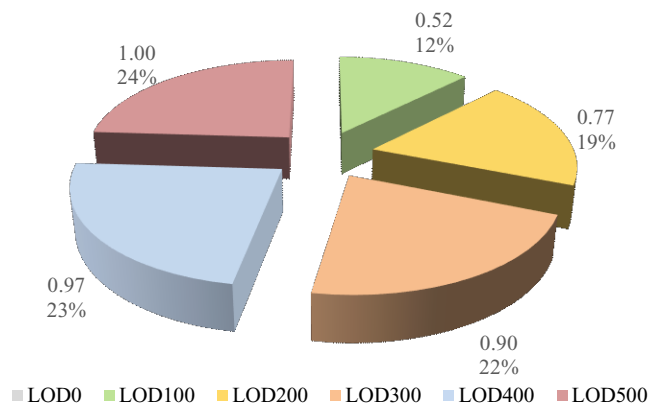


Figure 134. Proportion des LOD dans un modèle BIM global [%] et taux d'adéquation aux activités de GPI correspondants [Ø].

3. Nombre d'attributs par LOD et obsolescence des données

Bouygues Purchasing & VINCI construction (sous-collège éditeur BIM) proposent une estimation du nombre d'instances d'articles que comptent différents objets techniques (voiture, avion, immeuble). Cette étude identifie 300000 instances d'articles distinctes par immeuble, en sachant qu'un seul article possède plusieurs propriétés, et donc potentiellement plusieurs attributs : c'est donc une estimation un peu grossière qu'il faudrait pouvoir affiner. Toutefois c'est le nombre de données maximal que nous avons retenu pour un LOD500. À la lumière de ces deux études nous avons imaginé différentes lois de distribution qui pourraient représenter l'évolution du nombre de données contenus dans les LOD100 à LOD500.

On émet deux hypothèses :

- un modèle BIM contenant un max de références représente 300000 attributs ;
- un LOD est contenu dans le LOD supérieur (un LOD300 contient nécessairement un LOD200 plus 22% du nombre total d'attributs de la maquette).

On en déduit un nombre d'attributs total contenus dans chaque LOD. On ajuste les valeurs selon une loi polynomiale (Table 75 et Figure 135 ci-après).

Table 75. Contenu de données et proportion cumulée des LOD.

LOD	Proportion cumulée (%)	Contenu de données (nombre d'attributs)
LOD100	12%	37246
LOD200	31%	93082
LOD300	53%	158196
LOD400	76%	227942
LOD500	100%	300000

On définit ensuite le taux d'obsolescence des données associé à chaque LOD (on rappelle que le type de données et donc leur stabilité varient en fonction du LOD utilisé (voir §4.2.3.1). Ici, on s'appuie sur (Club Solvabilité 2, 2015; FEDENE and SYNTEC-INGÉNIERIE, 2016; FIDJI and Mazars, 2011) pour déterminer un taux d'obsolescence maximal cohérent : on choisit un taux d'obsolescence annuel maximal de 30% pour un LOD 500 (chaque année, 30% des données contenues dans la maquette BIM deviennent obsolètes : c'est le LOD le moins stable). À l'aide de la courbe d'effort relatif présentée précédemment, on calcule le taux d'obsolescence de chaque LOD. On ajuste les valeurs à l'aide d'une courbe de tendance exponentielle.

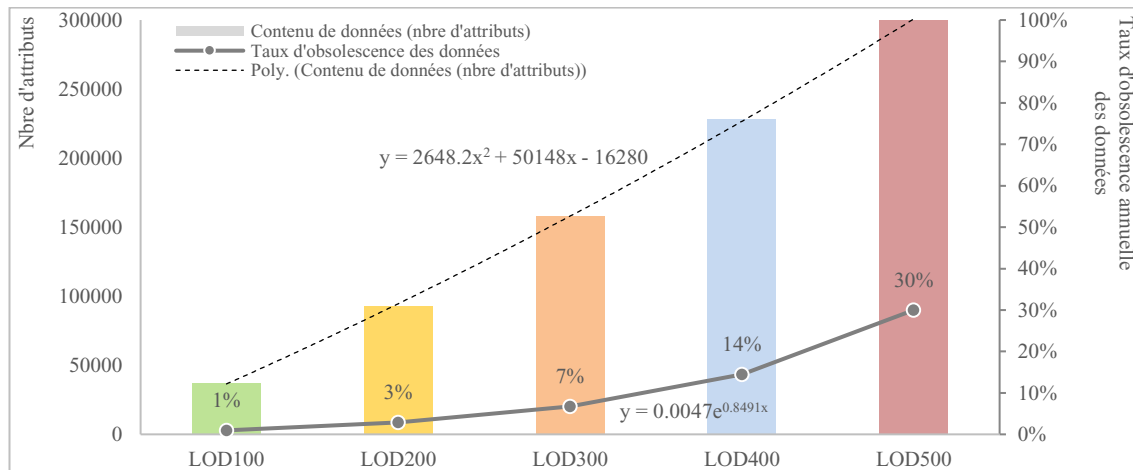


Figure 135. Nombre d'attributs et taux d'obsolescence des LOD.

4. Synthèse des caractéristiques des LOD

Table 76. Synthèse des caractéristiques des différents LOD dans MACARON.

LOD	Contenu de données [nombre d'attributs]	Proportion cumulée [%]	Adéquation aux activités de GPI [%]	Taux d'obsolescence annuelle des données [%/an]	Coûts d'acquisition/modélisation [BIM €/m²]	Effort relatif [%]
LOD100	37 246	12%	52%	1%	2,38	0,03
LOD200	93 082	31%	77%	3%	4,78	0,10
LOD300	158 196	53%	90%	7%	9,57	0,23
LOD400	227 942	76%	97%	14%	19,18	0,48
LOD500	300 000	100%	100%	30%	38,43	1,00

ANNEXE 3

MODELE DE COUTS DE MACARON

1. Diagramme de flux

Le modèle de coûts alimente les variables $Tot\ price(m,b,t)$, $expenditures(b,t)$ et $Bstock\ expenses(t)$. Ce sous-modèle permet l'estimation financière des missions à réaliser annuellement. Le découpage systémique du prix des missions tel que présenté en Figure 136 tient compte de la charge de travail à imputer aux effectifs. Le découpage systémique du prix des missions n'est pas le même à travers le modèle en fonction des besoins notamment pour l'analyse des résultats. Les montants d'investissements analysés en chapitre 7 par exemple, intègrent bien les investissements associés au système d'information ce qui n'apparaît pas ici.

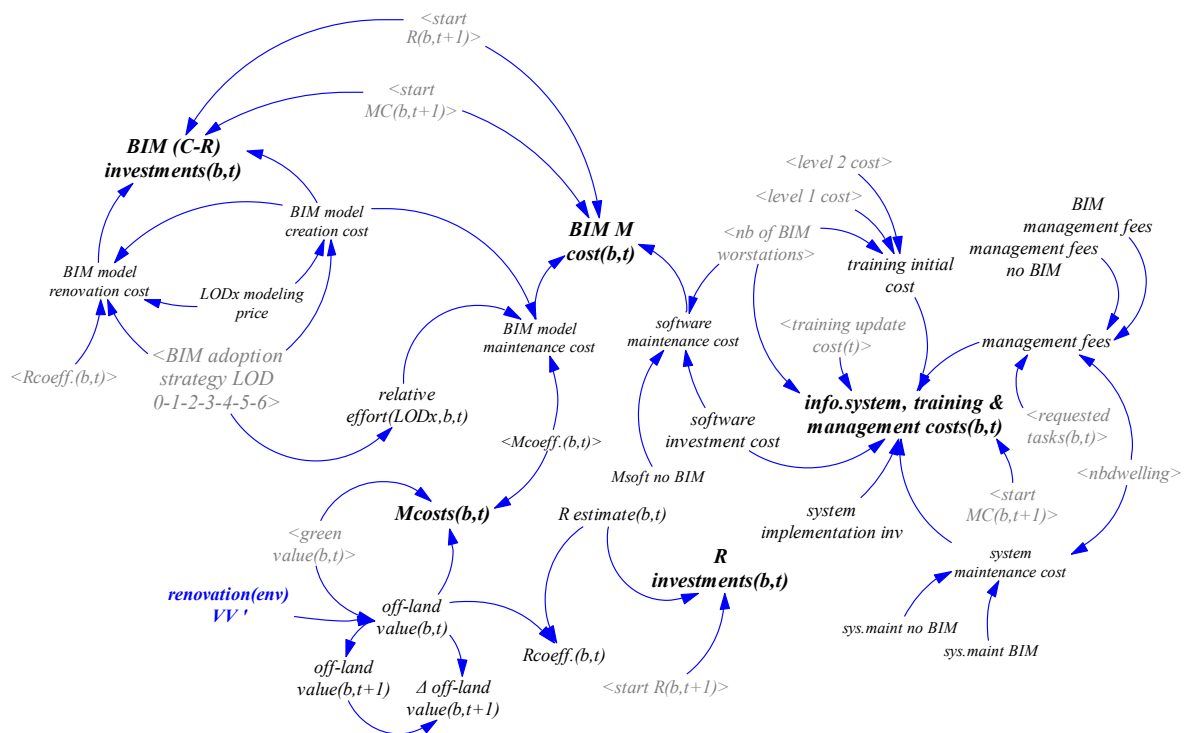


Figure 136. Diagramme de flux du modèle de coûts.

2. Nomenclature

Table 77. Nomenclature du diagramme de flux MICEF.

<i>BIM (C-R) investments(b,t)</i>
Investissement financier pour la construction (C) et la rénovation (R) du modèle de données du bâtiment b à l'instant t, en euro.
<i>LODx modeling price / BIM model creation cost / BIM model renovation cost</i>
<i>LODx modeling price</i> est le coût par unité de surface de l'acquisition et de la modélisation des données BIM pour un LOD donné (détail en annexe 2). <i>BIM model creation cost</i> est le coût total de la modélisation numérique du parc, produit de sa surface et du coût par unité de surface de l'acquisition et de la modélisation des données BIM pour un LOD donné. <i>BIM model renovation cost</i> est le coût de la rénovation du modèle de données BIM du bâtiment b au temps t, il correspond à une fraction $Rcoeff(b,t)$ du coût initial de la modélisation numérique du bâtiment b à l'instant $t=T_0$.
<i>BIM M cost(t)</i>
Coût total en euro de la maintenance des modèles de données BIM du parc au temps t.
<i>BIM model maintenance cost / relative effort (LODx,b,t)</i>
Coût en euro de la maintenance du modèle de données BIM du bâtiment b au temps t. Il correspond à une fraction $Mcoeff.(b,t)$ du coût initial de la modélisation numérique du bâtiment b à l'instant $t=T_0$ et est pondéré par <i>Relative effort (LODx,b,t)</i> l'effort relatif associé à un LOD donné, pour le bâtiment b au temps t (détail en annexe 2).
<i>Mcosts(b,t) / M coeff.(b,t) / off-land value(b,t)</i>
Les coûts de maintenance $Mcost(b,t)$ du bâtiment b au temps t représentent une fraction $Mcoeff.(b,t)$ de sa valeur hors-foncier <i>off-land value(b,t)</i> (détail au chapitre 3).
<i>R investments(b,t) / R estimate(b,t) / Rcoeff(b,t)</i>
<i>R investments(b,t)</i> est le montant en euro de l'investissement en rénovation pour le bâtiment b au temps t. Il vaut <i>R estimate(b,t)</i> également exprimé en euro (détail au chapitre 5 MEPE). Le rapport de la valeur hors foncier <i>off-land value(b,t)</i> sur le montant de l'investissement en rénovation <i>R investments(b,t)</i> permet de calculer le coefficient de rénovation $Rcoeff(b,t)$ du bâtiment b au temps t.
<i>Info.system, training & management costs(t)</i>
Coûts de fonctionnement en euro pour la gestion du système d'information, la formation des effectifs et la gestion du parc à l'instant t.
<i>system implementation inv./ system maintenance cost / sys.maint BIM / sys.maint no BIM</i>
<i>system implementation inv.</i> est le coût en euro de l'investissement alloué à l'implémentation d'un nouveau système d'information (BIM) au sein de l'organisation au temps $t=T_0$. <i>system implementation inv.</i> = 1700 €. <i>system maintenance cost</i> est le coût appliqué dans MACARON pour la maintenance annuelle du système d'information au temps t. <i>sys.maint no BIM</i> = 0 €/appartement non numérisé <i>sys.maint BIM</i> = 9 €/appartement numérisé
<i>training initial cost / training update cost</i>
<i>training initial cost</i> est le montant en euro de l'investissement initial à $t=T_0$ pour la formation des effectifs à la compétence BIM. <i>training update cost</i> est le montant en euro de la mise à jour des formations BIM à l'instant t (détail au chapitre 5 MERH).
<i>Software investment cost / Software maintenance cost / M soft no BIM / M soft BIM</i>
<i>Software investment cost</i> est le montant en euro de l'investissement initial à $t=T_0$ pour l'achat de licences logicielles compatibles BIM. <i>Software investment cost</i> = 4500 € x nb BIM workstations <i>Software maintenance cost</i> est le coût annuel en euro du renouvellement des licences logicielles. <i>M soft no BIM</i> = 100 € x nb tot workstations <i>M soft BIM</i> = <i>Software investment cost</i> = 4500 € x nb BIM workstations
<i>management fees / BIM management fees / management fees no BIM</i>
<i>management fees</i> est le montant en euro des coûts de gestion de l'organisation à l'instant t. <i>management fees no BIM</i> = 2 €/ m² bâtiment non numérisé <i>BIM management fees</i> = 1 €/ appartement numérisé

ANNEXE 4

PROFILS DES CONSOMMATIONS UNITAIRES AU SEIN DU PARC

1. Rappel des hypothèses initiales

- Logements et surface :
 - Distribution linéaire/aléatoire du nombre de logements par bâtiment
 - Nombre minimal : 20 logements
 - Nombre maximal : 50 logements
 - Surface unitaire / logement constante = 67 m²
- Consommations unitaires
 - Consommation unitaire croissante de B01 à B15⁹⁰
 - Parc étalé entre C+ (proche de la classe B) et G+ (proche de la classe F)
 - Consommation B01 = 100 kWhep/(m².an)
 - Consommation U B15 = 474 kWhep/(m².an)

2. PP A : répartition linéaire

Principe : distribution linéaire des consommations unitaires sur l'ensemble de l'intervalle [100 ; 474].

La consommation unitaire des logements du bâtiment Bi est donnée par :

$$C(Bi) = 26,714.i + 73,286 \text{ avec } i \in [1; 15]$$

La distribution par classe énergétique du profil PP B qui en résulte s'établit comme suit :

PP A	Inf	Sup		Effectif
	451		G	7%
	331	450	F	33%
	231	330	E	27%
	151	230	D	20%
	91	150	C	13%
	51	90	B	0%
		50	A	0%

3. PP B : répartition exponentielle

Principe : distribution exponentielle des consommations unitaires sur l'ensemble de l'intervalle [100 ; 474]. Cette distribution conduit, par rapport à PP A, à une répartition comptant moins de bâtiments très énergivores et donc à une consommation totale du parc moins élevée.

La consommation unitaire des logements du bâtiment Bi est donnée par :

$$C(Bi) = 89,481.1,1176^i \text{ avec } i \in [1; 15]$$

⁹⁰ Purement technique et pratique, ce classement n'a aucune incidence sur les résultats.

La distribution par classe énergétique du profil PP B qui en résulte s'établit comme suit :

PP B	Inf	Sup		Effectif
	451		G	7%
	331	450	F	20%
	231	330	E	20%
	151	230	D	27%
	91	150	C	27%
	51	90	B	0%
		50	A	0%

4. PP C : répartition logarithmique

Principe : distribution logarithmique des consommations unitaires sur l'ensemble de l'intervalle [100 ; 474]. Cette distribution conduit, par rapport à PP A, à une répartition comptant davantage de bâtiments très énergivores et donc à une consommation totale du parc plus élevée. Ainsi PP C présente deux bâtiments en classe G.

La consommation unitaire des logements du bâtiment Bi est donnée par :

$$C(Bi) = 459,34 \cdot \log(1 + 0,6508 \cdot i) \text{ avec } i \in [1; 15]$$

La distribution par classe énergétique du profil PP C qui en résulte s'établit comme suit :

PP C	Inf	Sup		Effectif
	451		G	13%
	331	450	F	47%
	231	330	E	20%
	151	230	D	13%
	91	150	C	7%
	51	90	B	0%
		50	A	0%

5. PP D : répartition sigmoïdale

Principe : distribution sigmoïdale des consommations unitaires sur l'ensemble de l'intervalle [100 ; 474]. Cette distribution conduit, par rapport à PP A, à une répartition comptant davantage de bâtiments aux extrêmes. La consommation moyenne et la consommation totale du parc sont similaires (très légèrement inférieures) à celles de PP A. PP D présente deux bâtiments en classe G. Les paramètres de la sigmoïde sont choisis pour obtenir une variation progressive de la consommation unitaire au sein du parc : $\mu = 9$ et $s = 3$.

La consommation unitaire des logements du bâtiment Bi est donnée par :

$$C(Bi) = C(B1) + \left(C(B15) - C(B1) \cdot \frac{S(Bi) - S(B1)}{S(B15) - S(B1)} \right) \text{ avec } i \in [1; 15]$$

avec

$$S(Bi) = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{i-9}{3}\right)}} \text{ avec } i \in [1; 15]$$

La distribution par classe énergétique du profil PP D qui en résulte s'établit comme suit :

PP D	Inf	Sup		Effectif
	451		G	13%
	331	450	F	27%
	231	330	E	13%
	151	230	D	20%
	91	150	C	27%
	51	90	B	0%
		50	A	0%

6. PP E : données du parc social

Principe : distribution reconstituant sur l'ensemble de l'intervalle [100 ; 474] une répartition par classe énergétique similaire à celle du parc social telle qu'établie par le CGDD, en répartissant les bâtiments au sein de leur classe et en forçant toutefois le maintien d'un bâtiment en classe G. La consommation moyenne et la consommation totale du parc sont assez nettement inférieures à celles de PP A ;

La distribution par classe énergétique du profil PP E qui en résulte s'établit comme suit :

PP E	Inf	Sup		Effectif
	451		G	7%
	331	450	F	7%
	231	330	E	13%
	151	230	D	40%
	91	150	C	27%
	51	90	B	7%
		50	A	0%