L’énergie au cœur du bâtiment

Les besoins en énergie et l’énergie gratuite récupérable sont des données essentielles pour le calcul du nouveau bilan proposé à l’équation (2). L’origine de ces données est présentée dans cette partie.

1. Les besoins en énergie

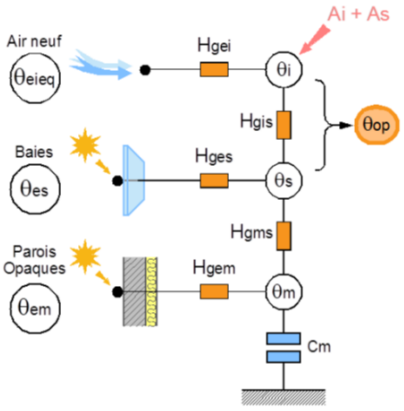
Les besoins en énergie pour le chauffage et l'ECS sont les composantes majeures du calcul des consommations. Ils sont calculés de diverses manières dans la littérature, une brève présentation est proposée dans cette partie afin de s'accorder sur la méthode qui sera utilisée dans les différents calculs présentés par la suite.

a. Caractérisation des besoins de chauffage

Il est difficile de parler de besoins de chauffage sans prendre en considération la notion de confort thermique. C'est pourquoi, deux types de modélisations peuvent être envisagés. Une modélisation via une simulation thermique dynamique qui laisse libre à l'utilisateur le choix des scénarios de chauffage et une modélisation règlementaire qui impose les scénarios.

i. Le calcul RT2012

Le modèle RT2012 **[ARRE2011]** décrit le comportement d'un groupe au pas de temps horaire. Il permet de connaître les besoins de chaud et de froid. Il s'appuie sur un modèle physique qui décrit l'ensemble des transferts. Il est caractérisé par le schéma d'un réseau à 5 résistances et 1 capacité représenté ci-dessous.



θeieq : température équivalente de l'air entrant dans le groupe
θes : température équivalente des baies
θem : température équivalente des parois opaques
θi : température de l'air
θs : température des baies
θm : température des parois opaques
Hgei : facteur de transmission thermique du renouvellement d'air
Hges : facteur de transmission thermique global pour les baies entre les environnements intérieurs et extérieurs
Hgem : facteur de transmission entre l'environnement extérieur et la surface intérieure des parois opaques
Hgis : facteur de transmission thermique dû aux échanges internes par convection et rayonnement
Hgms: facteur de transmission thermique entre les surfaces internes et l'air extérieur
Cm : capacité massique quotidienne du groupe
Ai : apports internes
As : apports solaires

Figure 7 : Modèle 5R1C de la RT2012

Il s'appuie également sur des scénarios précis qui retranscrivent le comportement des occupants. Ces scénarios proposent des algorithmes de gestion de chauffage, d'ouverture des baies… Les scénarios de chauffage pour le résidentiel collectif sont présentés ci-dessous, trois semaines de congés (deux premières semaines d'août et la dernière de décembre) sont également prises en compte avec une température de chauffage réduite à 7°C.

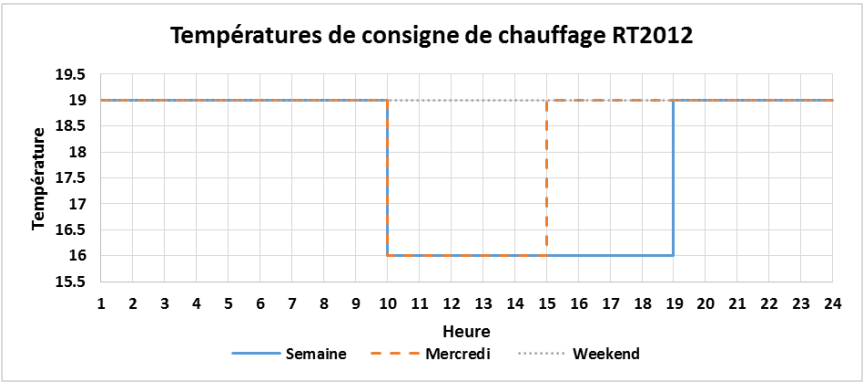


Figure 8 : Scénarios de températures de consigne du chauffage dans les logements RT2012

ii. *Les simulations thermiques dynamiques*

D'après la figure 9, issue de données de l'OQAL sur des études de la température des chambres menées entre 2003 et 2006 **[COMM2013]**, les températures de consignes utilisées dans le scénario réglementaire sont éloignées des pratiques usuelles des occupants.

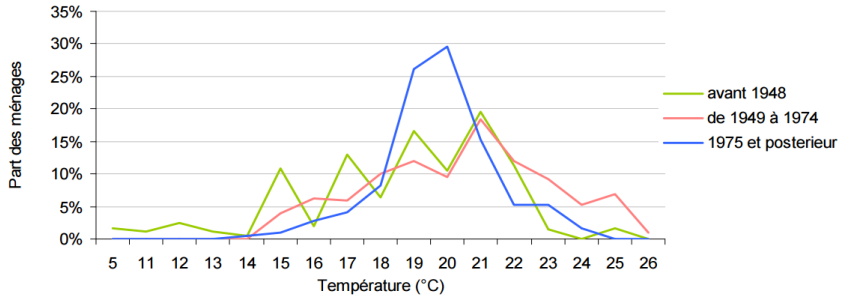


Figure 9 : Températures de chauffage de la chambre par date de construction du logement

Le tableau 6, d'une étude plus récente menée par le CREDOC **[DUJI2009]** sur 2075 habitations en 2009, tend à confirmer cette tendance.

	Nombre de pièces > 4		Nombre de pièces < 4	
	Occupation	Inoccupation	Occupation	Inoccupation
Pièces de vie	21	19	21	19
Chambres	18	16	21	19
Salle de bain	21	19	21	19

*Tableau 6 : Température de consigne de chauffage étude du CREDOC **[DUJI2009]***

L'utilisation de simulations thermiques dynamiques, avec des logiciels comme Pléiades+COMFIE® **[PEUP2005]** et TRNSYS® **[TRNS2014]** qui autorisent la création de scénarios, permettrait d'obtenir des besoins de chauffage plus proches de la réalité. Cependant, l'objectif de ces travaux est de proposer un outil simple d'utilisation. Une modélisation 3D de bâtiment et une simulation thermique dynamique sont couteuses en temps. Bien que moins proches de la réalité, les **besoins de chauffage issus du moteur de calcul RT2012** sont retenus en tant que données d'entrée de l'outil final, ce qui n'exclue pas l'utilisation de résultats issus de STD, s'ils sont disponibles.

b. Caractérisation des besoins en ECS

Peu d'études ont été menées ces dernières années en France sur le comportement des usagers vis-à-vis de l'utilisation de l'eau chaude sanitaire. Dans la figure 10, se trouve un récapitulatif des différents modèles de calculs proposés pour les puisages d'eau chaude sanitaire dont une analyse est proposée par l'ADEME ***[ADEM2011]***.

RT2012	5 puisages journaliers Fonction de la période de l'année Fonction de la surface habitable
Delebecque	Profil fonction du mois, du jour et de l'heure Fonction du nombre de personnes Fonction des appareils
Baeckroot	Profil fonction du mois, du jour et de l'heure Fonction du type et du nombre de points de puisage
AICVF	Profil fonction du mois, du jour et de l'heure Fonction de la surface habitable
GDF	Fonction du nombre d'occupants et des points de puisage
GRS Terrain	Profil fonction du mois, du jour et de l'heure Pas de calcul des besoins

Figure 10 : Profils de puisage ECS [RT2012], [AICV2004], [DELE1977], [BAEC2003], [CEGI1997]

A travers ces études et également les conclusions de la tache 1.1 du pacte SCE-ECS de l'ADEME, un besoin moyen va être déterminé ainsi que la méthode de répartition des puisages.

i. *Les besoins en ECS*

Les résultats sont difficiles à recouper car les méthodes de calcul se basent sur différents éléments (surface habitable, nombre d'occupants, nombre de salles de bains) et donnent des chiffres exprimés de manières diverses et difficilement comparables.

En se basant sur les chiffres moyens de l'INSEE **[INSE2006]**, un besoin journalier peut être estimé à environ 90L d'ECS à 60°C pour les méthodes de calcul utilisant la surface habitable **([AICV2004]**, **[RT2012]**). En se basant sur le chiffre d'occupation moyen de 2,3 personnes **[INSE2006]**, la méthode GDF **[CEGI1997]** propose un volume journalier de 87 L d'ECS à 60°C pour un logement. Au regard des différentes études, une consommation journalière de l'ordre de **37L d'ECS à 60°C par occupant** sera envisagée par la suite dans les différentes modélisations, il s'agit d'une donnée d'entrée du modèle, si l'utilisateur le souhaite, il pourra y intégrer son propre calcul. Cependant, il est important de caractériser de façon précise le volume d'eau puisée car il représente également un gisement d'énergie récupérable qui impactera le bilan final des consommations et par conséquent le dimensionnement des systèmes.

ii. *La répartition des besoins*

Le volume de puisage moyen journalier ayant été déterminé, une répartition doit être réalisée. Cette répartition des besoins se situe à trois échelles différentes : une répartition annuelle, une répartition hebdomadaire et une répartition mensuelle.

Afin d'établir une répartition, trois approches sont étudiées, la répartition de la RT2012 **[RT2012]**, la répartition de l'étude AICVF **[AICV2004]** et des données terrain de 4 logements issues du pacte SCE-ECS de l'ADEME.

<u>Correction annuelle</u>

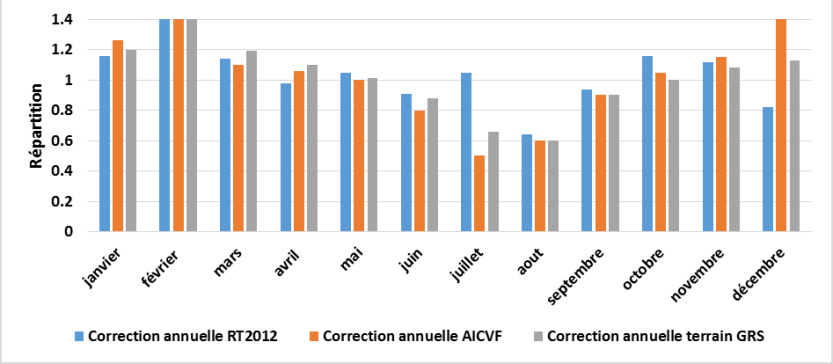


Figure 11 : Répartition annuelle des puisages ECS

La répartition de la RT2012 présente des différences avec le profil annuel de l'AICVF. Le profil de l'AICVF se rapproche plus des relevés terrain réalisés avec un écart moyen (en excluant le mois de juillet) de 5% contre un écart de 10% avec la RT2012. La **répartition annuelle de l'AICVF** est retenue.

<u>Correction hebdomadaire</u>

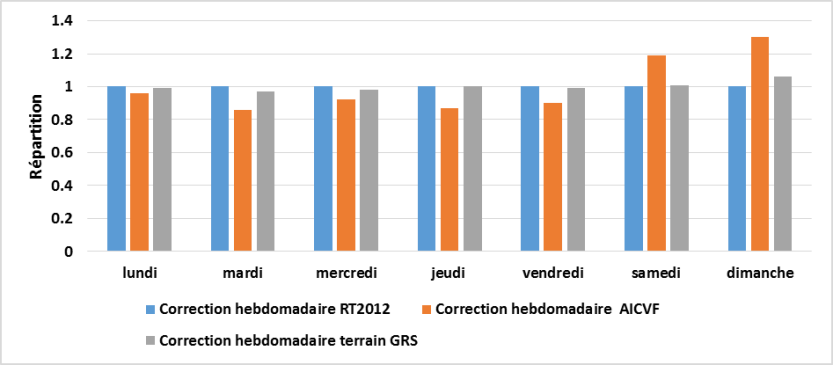


Figure 12 : Répartition hebdomadaire des puisages ECS

Les relevés terrain montrent que l'impact de la répartition hebdomadaire est très faible. Le profil de puisage de la RT2012 est celui qui s'en approche le plus. Les **puisages hebdomadaires** sont considérés de **même volume**.

Correction journalière

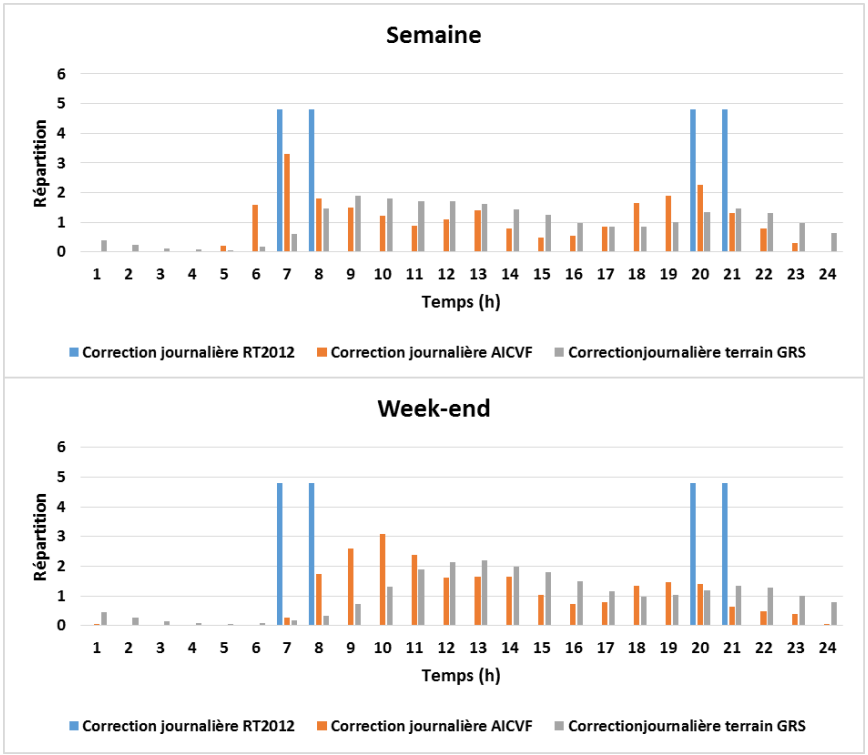


Figure 13 : Répartition journalière des puisages ECS

La RT2012 prévoit uniquement 5 puisages journaliers. Dans le cas de bâtiments collectifs, ce type d'approche n'est pas envisageable pour effectuer le dimensionnement des systèmes, le **foisonnement des puisages** doit être pris en compte. Par conséquent, le profil journalier de l'AICVF est retenu.

La consommation en eau chaude sanitaire retenue pour les études qui suivront est celle construite dans cette partie. Il est important de caractériser précisément l'utilisation de l'ECS au sein des foyers car il s'agit également d'un gisement d'énergie récupérable qui impacte le nouveau bilan des consommations. Afin d'en comprendre l'impact, une analyse du comportement de la boucle en fonction des scénarios de consommation d'ECS est présentée au chapitre 2.

Ainsi, les différents termes de l'équation (1.1) qui caractérisent le bilan traditionnel des consommations viennent d'être présentés. Maintenant, une étude sur le gisement des énergies disponibles va être proposée puis la seconde partie s'intéressera aux différentes méthodes permettant d'exploiter ce gisement.

2. L'énergie gratuite disponible

Cette partie permet de caractériser les différents gisements d'énergie gratuite récupérable qui seront repris dans le calcul du terme $E_{récupérée}$ intégré au nouveau calcul des consommations.

a. Caractérisation de l'énergie rejetée par les eaux usées

Les eaux usées ou eaux grises sont définies comme l'ensemble des eaux issues des logements hormis les eaux noires (eaux des WC). Il faut donc caractériser les volumes et les températures d'eau chaude sanitaire et d'eau utilisée pour les lave-linge et les lave-vaisselle.

i. Volume et température d'eau chaude sanitaire après usage

Les volumes et la fréquence d'utilisation de l'ECS ont été caractérisés dans la partie précédente, il reste à déterminer la température des eaux rejetées. Afin de simplifier le calcul de la température, les usages sont regroupés selon les résultats de l'enquête de satisfaction menée par CEGIBAT **[CEG1992]** dans le tableau 7.

	Température (°C)	Répartition en %
Douche	39	51%
Vaisselle	47	28%
Toilette	40	18%
lavage des mains	40	3%

Tableau 7 : Températures et volumes au-dessous desquels 80% des sujets ont déclaré satisfaction

La température moyenne des eaux usées pour l'ensemble de ces usages est de 41,4°C. Le volume d'eaux usées à considérer est fonction du volume déterminé par le calcul des besoins en eau chaude sanitaire, d'où l'importance de la caractérisation des puisages d'ECS, tant pour le volume que pour la répartition, dans la partie précédente.

D'après les résultats de la partie précédente, le volume d'eaux usées pour ces usages est **de 60L à 41,4°C** (avec une température d'eau froide de 10°C).

ii. Volume et température en sortie des appareils ménagers

Les machines à laver et les lave-vaisselle se sont démocratisés depuis quelques années. D'après une étude de l'INSEE datant de 2011, 95% des foyers possèdent un lave-linge et 54% un lave-vaisselle **[INSEE2011].** Le gisement d'énergie récupérable sur ces systèmes n'est pas négligeable, il faut donc les intégrer au calcul. Il faut également définir le volume et la température de l'eau récupérée.

Les données issues du rapport de la campagne de mesures des appareils de lavage proposé par l'ADEME **[ADEM2008]** sont utilisées.

Volume et température moyenne d'un cycle :

	Température moyenne (°C)	Volume (l/h)
Lave-linge	40	50
Lave-vaisselle	50	13

Tableau 8 : Températures et volumes d'eau pour un cycle de lave-vaisselle et de lave-linge

Nombre de cycle par personne :

D'après la campagne de mesures réalisée par l'ADEME **[ADEM2008]**, le nombre moyen de cycle par personne de machine à laver est de 1,7 cycles/semaine. Cependant, les résultats ne sont pas homogènes, sur l'échantillon de 100 logements analysés le maximum de cycle est de 4,5 et le minimum de 0,3, soit une échelle de 1 à 15. Le nombre moyen de cycle par personne de lave-vaisselle est de 1,63cycles/semaine. Cependant, comme pour les cycles des lave-linge, la plage de résultats est très grande, sur l'échantillon de 100 logements analysés le maximum de cycle est de 5 et le minimum de 0,17, soit une échelle de 1 à 23. Cependant, les travaux portent sur des bâtiments collectifs, il est donc possible de travailler à partir des valeurs moyennes.

Quant à l'utilisation des lave-linge et des lave-vaisselle, elle diffère en fonction des jours de la semaine et des heures comme l'illustre les graphiques de l'Annexe 1. Les usages sont plus importants le lundi, le mercredi, le samedi et le dimanche. Ce sont les jours durant lesquels, il y a le plus de personnes en congés. Les lessives sont lancées principalement dans la matinée, la courbe diminue ensuite progressivement et les pics d'utilisation des lave-vaisselle ont lieu après chaque repas.

Pour conclure sur ces usages, le volume moyen pour les lave-linge est de **85L/semaine à 40°C** et le volume moyen pour les lave-vaisselle est **de 22L/semaine à 50°C** par occupant. Les répartitions retenues sont celles de l'Annexe 1.

iii. Bilan sur la récupération des eaux usées

L'objectif est de déterminer une température moyenne ainsi qu'un volume total d'eaux usées à partir des usages vus précédemment.

Les hypothèses tirées des différentes études sont récapitulées ci-dessous :

	Température (°C)	Volume par semaine (l)	Répartition
Usages ECS	41.4	420	80%
Lave-linge	40	85	16%
Lave-vaisselle	50	22	4%
Température moyenne	**41.5**		

Tableau 9 : Températures, volumes et répartitions des différents usages d'eau chaude

Dans le réseau de récupération, il faut également prendre en considération les puisages d'eaux froides. L'étude du centre d'information sur l'eau est utilisée pour connaître la répartition totale des usages.

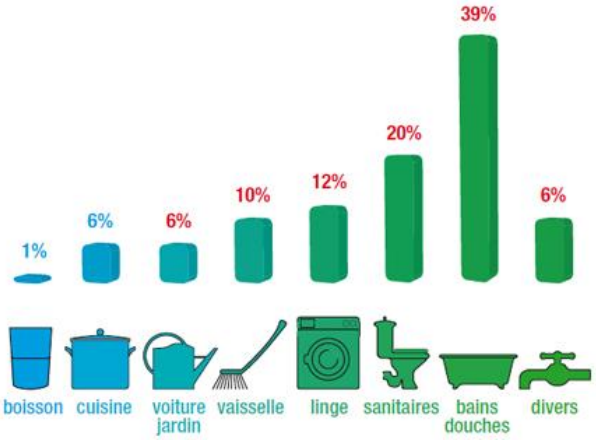


Figure 14 : Répartition de l'utilisation de l'eau dans les ménages

Les usages pour le jardin et la voiture ainsi que pour les sanitaires ne sont pas pris en considération pour la récupération. Une répartition sur les puisages est proposée dans le tableau 10.

	Répartition Totale	Température (°C)
Boisson	1%	10
Cuisine	8%	10
Vaisselle	6.4%	50
Lave-vaisselle	7.6%	50
Linge	16%	40
Hygiène corporelle	53%	40
Divers	8%	40

Tableau 10 : Températures et répartitions des différents usages d'eau

Les répartitions sur l'eau chaude sont proches de celles du tableau 9. Les usages d'eau froide ne représentent que 9% de la consommation totale en eau.

En utilisant la répartition du tableau 10, la température moyenne de l'eau évacuée est de 38,8°C. C'est cette température qui sera retenue. Il faut également prendre en considération les pertes de distribution, une chute de 3K est estimée, soit une température de **36°C au niveau du récupérateur.** Le calcul du volume des eaux usées se base sur le calcul du besoin d'eau chaude sanitaire. Il permet de déterminer le volume moyen d'eau chaude sanitaire utilisé sur une journée qui représente 67% du volume total rejeté. Ainsi, il est possible de connaître le volume totale rejeté et de déterminer les différents volumes en fonction des usages à partir du tableau 10 (lave-linge, lave-vaisselle, ensemble des autre usages). Les répartitions journalières et hebdomadaires présentées précédemment sont ensuite appliquées.

b. Caractérisation de la récupération sur air extrait

Le second type de récupération du nouveau terme $E_{récupérée}$ du bilan énergétique proposé en introduction est l'énergie récupérée sur l'air extrait. Pour déterminer le potentiel de récupération sur l'air extrait, trois données sont nécessaires : le ou les débits d'air, la température de l'air, l'humidité relative de l'air. Un fichier unique par bâtiment regroupant, à minima au pas horaire, la température moyenne, le débit d'extraction moyen et l'humidité relative est nécessaire en entrée du modèle.

L'ensemble du réseau de ventilation est considéré en volume chauffé. La température d'extraction avant le ventilateur est prise égale à la température de l'air de la zone d'extraction. Si plusieurs zones sont considérées, la température sera égale à :

$$T_{ae} = \frac{\sum_i^{nzone} Qae_i * Tae_i}{\sum_i^{nzone} Qae_i} \quad (1.4)$$

Le débit d'air à l'entrée du ventilateur est égal à la somme des débits des différentes zones.

La température après impact du ventilateur est égale à :

$$T_{ae_{finale}} = T_{ae} + \frac{\tau * P_{ventilateur}}{\rho_{ae}(Cp_{ae} + W_{ae} * C_v) * Q_{ae}} \quad (1.5)$$

τ : taux de récupération sur les ventilateurs

Pour la suite de l'étude, le débit, l'humidité relative et la température de l'air seront repris de la simulation RT2012 **[ARRE2011]**. La température issue du calcul est la température après ventilateur, il n'est donc pas nécessaire d'apporter une correction (paragraphe 8.1 RT2012 **[ARRE2011]**).

c. Caractérisation de la récupération solaire

Le dernier type de récupération du nouveau terme $E_{récupérée}$ du bilan énergétique proposé en introduction est l'énergie solaire thermique récupérée. Pour déterminer le potentiel de récupération solaire, le rayonnement solaire incident et la température extérieure sont nécessaires au pas horaire. Il est possible de calculer le rayonnement solaire incident à partir de données météorologiques (rayonnement solaire direct normal, rayonnement solaire diffus horizontal, azimut du soleil et vitesse du vent…), l'ensemble de ces données sont fournies dans les fichiers météorologiques de la RT2012 mais aussi dans des bases de données telles que Météonorm **[METE2015]**. Le rayonnement solaire incident pour une inclinaison et une orientation est calculé suivant la méthode de calcul de la RT2012 (paragraphe 5.2.3 et 13.3.3 **[ARRE2011]**).

Les données nécessaires au calcul des différents termes du nouveau bilan énergétique sur les consommations présenté en introduction de ce chapitre viennent d'être présentées. Les besoins de chauffage et d'ECS qui sont à la base de ce calcul ont été explicités et seront repris dans l'ensemble des exemples présentés dans la suite du mémoire. Il reste à caractériser les techniques qui permettront d'exploiter le gisement d'énergie gratuite évalué dans les paragraphes précédents.

Ces travaux n'ont pas vocation à développer de nouveaux systèmes, la partie qui suit s'intéresse brièvement aux technologies disponibles et développe leurs modélisations afin d'expliciter le calcul de l'ensemble des termes de l'équation (1.6).

$$E_{consommée} = \alpha * \left(Besoin_{chauffage} + Besoin_{ecs} - Apport_{gratuit}\right) - \left(E_{récupérée} - E_{stockée}\right) \quad (1.6)$$

III. Les systèmes et leurs modélisations

Les besoins de chauffage et d'ECS ont été définis, il faut cependant passer à un calcul de consommation qui est caractérisé par le coefficient multiplicateur (α) dans l'équation (1.6). Il matérialise à la fois le rendement du générateur et les pertes du réseau. Le calcul des pertes ne sera pas détaillé dans ce chapitre, seul la modélisation des générateurs est présentée. Enfin, afin d'expliciter le calcul des termes $E_{récuéprée}$ et $E_{stockée}$ du nouveau bilan énergétique, un état de l'art des différentes méthodes de modélisation des systèmes de récupération et de stockage est proposé.

1. La génération

Dans les travaux proposés, le principal système de génération utilisé est la pompe à chaleur (PAC). Des appoints peuvent également être pris en compte mais leur intégration est secondaire. Dans cette partie, seule les différentes modélisations des PAC sont considérées. Le projet s'intéresse aux échanges via le vecteur eau. Par conséquent, les pompes à chaleur eau/eau sont considérées. Elles soutirent de la chaleur à la source froide puis l'énergie est transformée via un cycle thermodynamique et transmise à la source chaude qui alimente le réseau de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Ces systèmes sont caractérisés par leurs coefficients de performance (COP). Pour les PAC eau/eau, il est supérieur à 4 pour un régime de 7/45. Ces travaux cherchent à optimiser le régime de fonctionnement de la PAC en essayant de maintenir la source froide à une température constante assez élevée tout au long de l'année grâce à la récupération et au stockage. Si la température de la source froide atteint 18°C, la valeur du COP augmente de 20% dans le modèle de la règlementation thermique 2012.

L'intérêt des travaux n'est pas de modéliser le comportement physique de la PAC mais de modéliser son comportement de façon globale. Il est nécessaire de connaître la puissance disponible et le COP de la machine en fonction des températures d'entrée des fluides dans la PAC. Il existe deux types d'approches : une première qui consiste à créer des polynômes et une seconde qui utilise les interpolations à partir de matrices de performances. Elles sont succinctement présentées ci-dessous.

Marisot et al. **[MARI45]** proposent un modèle de pompe à chaleur basé sur le coefficient de performance théorique maximal donné par le facteur de Carnot. Les performances sont ainsi évaluées en fonction de la température d'entrée évaporateur et sortie condenseur. Le rapport entre la puissance absorbée et la puissance calorifique s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{P_{abs}}{P_{cons}} = \left(\frac{P_{abs}}{P_{cons}}\right)_{nom} (1 + C_1\Delta T + C_2\Delta T^2) \quad (1.7)$$

$$\Delta T = \frac{T_{e,evap}}{T_{s,conden}} - \left(\frac{T_{e,evap}}{T_{s,conden}}\right)_{nom} \quad (1.8)$$

Une loi est également proposée afin de déterminer la puissance calorifique.

$$P_c = (P_c)_{nom}(1 + D1(T_{e,evap} - T_{e,evap,nom}) + D2(T_{s,cond} - T_{s,cond,nom}) \quad (1.9)$$

Les coefficients C1, C2 et D1, D2 doivent être déterminés à partir de valeurs fournies par le constructeur.

Le modèle de la RT2012 propose d'utiliser une matrice de performances issue de tests effectués par des organismes accrédités ou bien de reconstruire une matrice de performances de la PAC à partir de points pivots. Ensuite, une méthode d'interpolation est utilisée afin de déterminer les performances de la machine pour des températures en entrée d'évaporateur et en sortie de condenseur données (paragraphes 10.21 et 10.22 de la RT 2012 **[ARRE2011]).** C'est ce type d'approche qui sera utilisée dans les différents calculs.

Maintenant que l'ensemble des éléments nécessaires à la résolution de l'équation classique de l'énergie consommée (1.1) ont été présentés, afin d'expliciter le calcul des termes $E_{récuéprée}$ et $E_{stockée}$ du nouveau bilan énergétique des consommations, un état de l'art des différentes méthodes de modélisation des systèmes de récupération et de stockage est proposé.

2. Les systèmes de récupération

Dans cette partie, l'objectif est d'effectuer un état de l'art des méthodes de calculs permettant de caractériser l'ensemble des termes du bilan sur les énergies récupérées.

$$E_{récupérée} = E_{eu} + E_{ae} + E_{st} \quad (1.10)$$

a. Récupération sur les eaux usées

Les solutions de récupération sur les eaux usées se démocratisent. Bien que la plupart des systèmes soient récents, certains d'entre eux sont bien documentés et commencent à être reconnus. Les retours d'expériences sont quant à eux assez rare malheureusement. Deux catégories de systèmes

sont proposées : des systèmes sans stockage intégré et avec stockage intégré. Une description détaillée de ces systèmes et un exemple d'application sont proposés en Annexe 2.

A partir des différentes technologies identifiées en Annexe 2, la récupération sur les eaux usées se fait toujours grâce à un échange entre les eaux usées et le fluide caloporteur qui est de l'eau. Deux approches de modélisation sont possibles : les approches physiques de calcul d'échange à partir des différentes températures et les calculs plus macroscopiques réalisés à partir de données issues d'essais. Elles se basent toutes sur le bilan suivant :

$$P_{eu} = Q_c * Cp_c * (Tc_e - Tc_s) = Q_f * Cp_f * (Tf_s - Tf_e) \quad (1.11)$$

Il existe deux méthodes classiques qui permettent de calculer l'énergie échangée **[ASHR2006].** Une méthode réalisée à partir du calcul de l'écart de température moyen pour les échangeurs parallèles et une méthode avec le calcul du nombre d'unités de transfert (NUT). Ces deux méthodes nécessitent de connaître le coefficient d'échange (UA) qui est fonction des coefficients de convection forcée et de la conductivité de la paroi.

Méthode de l'écart moyen des températures :

$$P_{eu} = UA * DTLM \quad (1.12)$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_e - \Delta T_s}{\ln(\frac{\Delta T_e}{\Delta T_s})} \quad (1.13)$$

Cette méthode n'est pas adaptée à la démarche proposée car elle nécessite de connaître l'ensemble des températures en entrée et en sortie de l'échangeur.

Méthode du NUT :

$$C_{min} = Min(Q_c * Cp_c, Q_f * Cp_f) \quad (1.14)$$

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \quad (1.15)$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (1.16)$$

Le calcul de la puissance récupérée se base sur celui de l'efficacité.

$$P_{eu} = \varepsilon * C_{min} * (Tc_e - Tf_e) \quad (1.17)$$

Cette efficacité peut être déterminée avec des corrélations, celles pour les courants parallèles sont données ci-dessous, pour les autres échangeurs elles sont disponibles dans la littérature.

Courants parallèles et de même sens	$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NUT(1+C))}{1+C}$
Courants parallèles et de sens contraires	$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NUT(1-C))}{1 + Cexp(-NUT(1-C))}$

Tableau 11 : Coefficients d'échange pour les courants parallèles

Des travaux menés au Canada, notamment sur des systèmes Power Pipe **[ZALO2007]**, permettent de valider les modélisations avec le NUT. Cette étude confronte l'énergie échangée obtenue de manière expérimentale à celle calculée avec la méthode du NUT pour des courants parallèles de sens contraire. Deux configurations sont considérées : la configuration A qui distribue l'eau tempérée vers le ballon et la configuration B qui est mixte (redistribution vers les douches puis vers le ballon). La température des eaux usées prend les valeurs de 37, 41 et 45°C. Les courbes expérimentales et théoriques sont quasiment superposées pour l'ensemble des simulations d'après la figure 15, ce qui permet de valider la modélisation par le calcul du NUT.

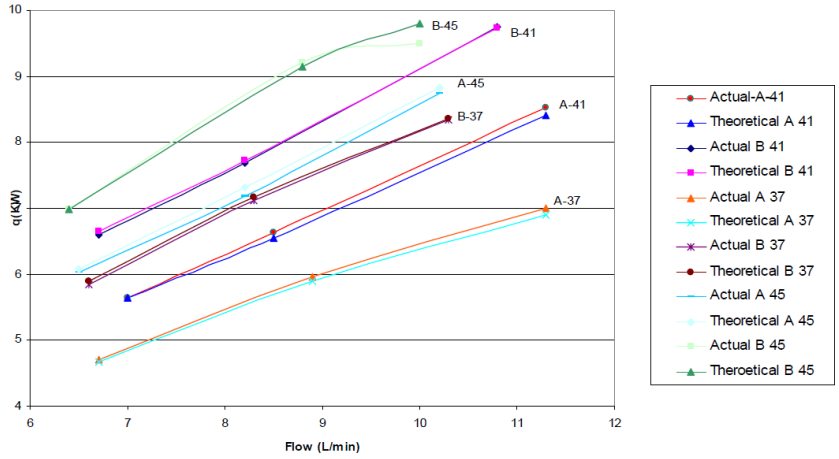


*Figure 15 : Confrontation des résultats expérimentaux et théoriques : Evolution de la puissance récupérée en fonction du débit **[ZALO2007]***

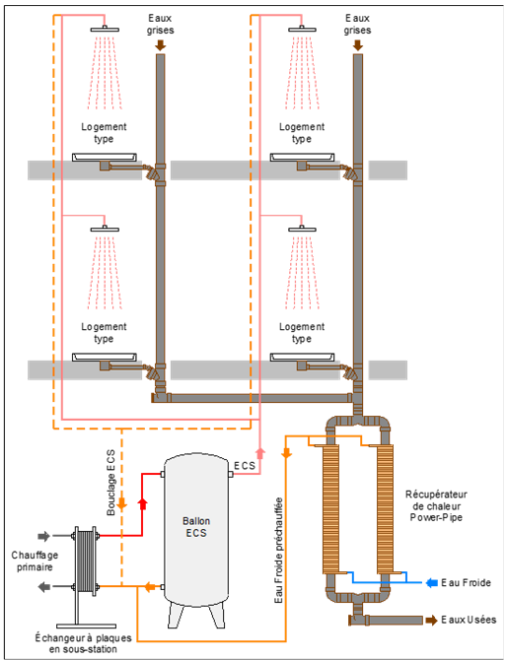
Autre méthode :

Il existe également des modèles qui se basent uniquement sur des coefficients de correction. Le titre V système générique sur les systèmes de récupération instantanée **[ARRE2013]** propose ce type d'approche plus macroscopique. Les besoins d'ECS et des coefficients de correction permettent de déterminer l'énergie récupérée.

$$P_{eu} = 0.9 * B_{ecs} * Eff_{recup} * \frac{P * F_{aa} * F_{am} * F_{av}}{\eta_{tot}} \quad (1.18)$$

B_{ecs} = besoin d'ECS en kWh/an
Eff_{recup} = efficacité globale du système de récupération
P = portion d'eaux usées traitée par le récupérateur de chaleur
F_{aa} = facteur de pertes dans l'air ambiant pendant la douche
F_{am} = facteur de pertes en amont du récupérateur
F_{av} = facteur de pertes en aval du récupérateur
η_{tot} = rendement de la génération

Dans le cadre du PACTE SCE-ECS, une installation a été instrumentée. Il s'agit d'un immeuble collectif d'une cinquantaine de logements. Cette installation regroupe 11 Power Pipe qui alimentent en eau tempérée un ballon d'ECS comme l'illustre la figure 16. Les systèmes ont été instrumentés de manière à connaître les températures en entrée et en sortie des Power Pipe, ainsi que les débits. Malheureusement, aucunes données sur les températures d'eaux grises ne sont disponibles avec cette étude. L'efficacité moyenne annuelle estimée à partir des données est de 26%. D'après le calcul basé sur l'arrêté **[ARRE2013]** présenté dans le tableau de la figure 16, l'efficacité moyenne théorique est de 25,7% en tenant compte de l'efficacité des récupérateurs et des facteurs de pertes uniquement. Les valeurs obtenues sont similaires ce qui permet de valider cette approche plus macroscopique effectuée à partir de tables de coefficients.



	Power pipe C4-48	Power pipe C4-60
Nombre	3	8
Effrecup	0.274	0.304
Faa	0.890	0.890
Fam	0.984	0.984
Fac	0.992	0.992
Efficacité_finale	0.238	0.264
Efficacité totale	0.257	

Figure 16 : Schéma de principe d'une installation Power Pipe et Calcul théorique de l'efficacité

Deux méthodes sont envisageables pour déterminer l'énergie récupérée (Eeu), la méthode du NUT ainsi que la méthode macroscopique basée sur des coefficients. Ces méthodes seront reprises lors de la réalisation et la vérification du modèle.

b. Récupération sur air extrait

Il existe diverses façons de récupérer de l'énergie sur l'air extrait. Le système de récupération le plus connu est la ventilation double flux, son rendement est d'environ 90% **[CERTITA]**. Les PAC air/air permettent également de récupérer de l'énergie sur l'air extrait. Cependant, dans le cadre de ces travaux, seul la récupération faisant intervenir l'eau comme fluide de transfert est considérée. Les technologies intéressantes pour la récupération sur l'air extrait sont donc les batteries froides. Elles ne sont pas utilisées pour refroidir l'air et climatiser mais pour refroidir l'air et transférer l'énergie à l'eau, aucune machine frigorifique n'y sont associées. Les batteries sont généralement des batteries à eau froide circulaire à courants croisés. Leur efficacité varie entre 0,4 et 0,7 pour des régimes de températures de 7-12°C pour l'eau et une température de l'air de 25°C **[ATLA2012], [FRAN2012].**

Une modélisation classique avec calcul du coefficient d'échange et du nombre d'unité de transfert est possible **[BRAN1993], [MARC2002]**. L'échangeur est assimilé à un échangeur croisé avec un fluide brassé côté air et un fluide non brassé côté eau. Contrairement au cas des échangeurs sur eaux usées, un calcul avec la méthode de différence logarithmique est difficilement envisageable car une correction, qui est fonction des températures de sorties, doit être apportée. Quant au coefficient global d'échange de chaleur, il peut être déterminé à partir d'un point de fonctionnement de la batterie. Le calcul de l'efficacité par le calcul du NUT est présenté ci-dessous.

Détermination des débits massiques :

Pour le débit massique d'eau :

$$Q_{eau} = \frac{Qv_{eau} * \rho_{eau}}{3600} \quad (1.19)$$

Pour le débit massique d'air :

$$Q_{ae} = \frac{Qv_{ae} * \rho_{ae}}{3600} \quad (1.20)$$

Le calcul de la masse volumique de l'air en fonction de la température est défini ci-dessous :

$$\rho_{ae} = 1.292 * \frac{273.15}{273.15 + T_{ae}} \quad (1.21)$$

L'humidité spécifique est déterminée à partir de la pression de vapeur saturante et de l'humidité relative :

$$W = \frac{0.62198 * Pre_{sat}}{Pre_{atm} - Pre_{sat}} * \frac{HR}{100} \quad (1.22)$$

Avec : Patm égale à 101325 Pa et Psat est calculée de la manière suivante :

$$Pre_{sat} = 10^{u} \quad (1.23)$$

Avec : si Tair>0

$$u = 2.7862 + \frac{7.5526 * T_{ae}}{239.21 + T_{ae}} \quad (1.24)$$

Sinon

$$u = 2.7862 + \frac{9.7561 * T_{ae}}{272.67 + T_{ae}} \quad (1.25)$$

Détermination de l'efficacité :

$$C_{min} = Min(Q_{ae} * (Cp_{ae} + Wae * C_v), Q_{eau} * Cp_{eau}) \quad (1.26)$$

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \quad (1.27)$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (1.28)$$

L'efficacité est le rapport de la puissance fournie sur la puissance maximale.

Si Cmin=Ceau

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-\frac{1}{C} * (1 - \exp(-C * NUT))\right) \quad (1.29)$$

Sinon

$$\varepsilon = \frac{1}{C} * (1 - \exp\big(-C * (1 - \exp(-NUT))\big) \quad (1.30)$$

Caractérisation du coefficient d'échange UA :

L'hypothèse est faite de l'homogénéité de l'eau et de l'air en dehors de la couche limite. L'échange entre le courant d'air et le tube s'écrit :

$$d\dot{P} = U_{ext} * dA(T_{ae} - T_{tube}) \quad (1.31)$$

La conduction dans le tube est négligée du fait de la grande conductivité des matériaux employés devant les phénomènes convectifs, l'échange entre le tube et le courant d'eau s'exprime :

$$d\dot{P} = U_{int} * dA(T_{tube} - T_{eau}) \quad (1.32)$$

L'hypothèse sur un échange direct entre l'air et l'eau permet d'introduire l'expression de deux résistances en série.

$$\frac{1}{UdA} = \frac{1}{U_{ext}dA_{ext}} + \frac{1}{U_{int}dA_{int}} \quad (1.33)$$

L'échange de chaleur et de masse au sein de la batterie est alors décrit par :

$$d\dot{P} = UdA * (T_{air} - T_{eau}) \quad (1.34)$$

Les caractéristiques sont déterminées à partir d'un point de fonctionnent en utilisant la méthode des différences logarithmiques des températures appliquées à un échangeur contre-courant. Un facteur correctif est introduit car la batterie ne peut être assimilée à ce type d'échangeur en utilisant les corrélations de Smith **[BOWM1940]**.

$$Q_{ref} = UA_{ref} * F * \Delta Tlm \quad (1.35)$$

$$\Delta Tlm = \frac{(Te, ae - Ts, eau) - (Ts, ae - Te, eau)}{\ln(\frac{Te, ae - Ts, eau}{Ts, ae - Te, eau})} \quad (1.36)$$

Le facteur F permet de prendre en considération la configuration courant-croisé.

$$F = \frac{r}{r_0} \quad (1.37)$$

$$r = \frac{q}{\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{q}{p} * \ln\left(\frac{1}{1-p}\right)}\right)} \quad (1.38)$$

$$r_0 = \frac{p - q}{\ln\left(\frac{1-q}{1-p}\right)} \quad (1.39)$$

$$p = \frac{Te, ae - Ts, ae}{Te, ae - Te, eau} \quad (1.40)$$

$$q = \frac{Ts, eau - Te, eau}{Te, ae - Te, eau} \quad (1.41)$$

Les coefficients d'échange de référence (UA, UAint, UAext) peuvent ainsi être déterminés. Une clé de répartition est utilisée afin de déterminer UAint et UAext. Cette clé est déterminée à partir de valeurs de dimensionnements typiques de batteries froides.

$$UA_{ref} = \frac{Q_{ech}}{\Delta Tlm * F} \quad (1.42)$$

$$UA_{int_{ref}} = (n+1)UA_{ref} \quad (1.43)$$

$$UA_{ext_{ref}} = \frac{n+1}{n} UA_{ref} \quad (1.44)$$

$$n = 1.89 \quad (1.45)$$

Les corrélations, pour une batterie froide dans le cas d'un fonctionnement en régime sec, permettent de donner l'évolution des coefficients d'échange en fonction des débits d'air et d'eau.

$$UA_{int} = UA_{int_{ref}} * \frac{Q_{eau}^{0.8}}{Q_{eau_{ref}}^{0.8}} \quad (1.46)$$

$$UA_{ext} = UA_{ext_{ref}} * \frac{Q_{ae}^{0.68}}{Q_{ae_{ref}}^{0.68}} \quad (1.47)$$

Cette modélisation permet de calculer à chaque pas de temps l'énergie transférée par l'air à la boucle d'eau. Tout comme pour la récupération sur les eaux usées, il est possible de proposer une modélisation plus macroscopique à partir d'un coefficient d'échange moyen fourni par les constructeurs. Ces deux méthodes sont envisageables pour déterminer l'énergie récupérée sur l'air extrait (Eae). Elles seront reprises lors de la réalisation et la validation du modèle.

c. Récupération solaire thermique

La récupération solaire, qu'elle se face par le biais de panneaux solaires thermiques ou hybrides représente un gisement d'énergie important. Cette partie s'intéresse uniquement aux panneaux solaires thermiques. Deux catégories de capteurs sont envisageables : les capteurs plans et les capteurs sous vide. Tous deux sont caractérisés par un rendement et deux coefficients de déperditions. Les capteurs plans vitrés sont composés d'une surface absorbante qui s'échauffe et échange avec le fluide. Le tout étant intégré dans un coffre isolé sur lequel est fixé un vitrage. Ces capteurs offrent de bons rendements (0,7-0,8), les déperditions sont quant à elles plus élevées (environ 4 W/m².K). Les capteurs sous vide sont plus performants. Les déperditions sont moins importantes (environ 1 W/m².K) grâce à l'utilisation de tube sous vide contenant l'absorbeur, quant à l'efficacité, elle est sensiblement identique à celle des capteurs plans.

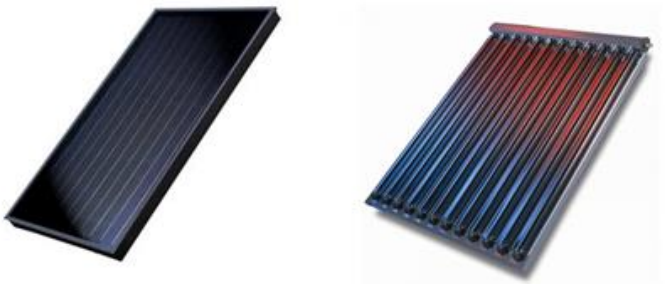


Figure 17 : Capteur plan vitré et capteur sous vide

La modélisation du solaire thermique, passe dans un premier temps par le calcul du rayonnement incident (G) à la paroi puis par la modélisation des panneaux et de l'échange avec le fluide caloporteur. Une modélisation est possible suivant la norme EN 12975-1. Le rendement est donné par l'équation suivante :

$$\eta = \eta_0 - a_1 * \frac{Tf_m - Text}{G} - a_2 * \frac{(Tf_m - Text)^2}{G} \quad (1.48)$$

η0 : efficacité
a_1 : coefficient de perte du premier ordre (W/m².K)
a_2: coefficient de perte du second ordre (W/m².K²)
Text : température extérieure
Tf_m : température moyenne de la boucle solaire.

A partir de ce rendement la puissance échangée peut-être déterminée :

$$P_{st} = \eta * S * G \quad (1.49)$$

Cette méthode de calcul permet de calculer le dernier terme de l'équation de l'énergie récupérée. Elle sera reprise par la suite.

Dans cette partie, des méthodes de calculs, permettant de caractériser l'ensemble des termes de l'équation sur l'énergie récupérée, ont été explicitées. Il ne s'agit pas d'une présentation exhaustive de l'ensemble des méthodes de calculs envisageables, la présentation a été restreinte à celles qui seront reprises dans les chapitres suivants afin de construire et de valider le modèle.

3. Le stockage

Dans cette partie, l'objectif est d'effectuer un état de l'art des techniques de stockage et des méthodes de calculs permettant de caractériser l'énergie stockée ($E_{stockée}$) qui apparait dans le nouveau bilan énergétique proposé en introduction.

a. Stockage en cuve

L'eau offre de bonnes capacités de stockage. Sa capacité thermique massique permet de stocker une importante quantité d'énergie dans des volumes acceptables. Il est possible de recenser 3 types de stockage : les ballons, les cuves en PVC, en acier ou en béton et les citernes souples. Une présentation de ces stockages est proposée en Annexe 3 ainsi que des exemples de réalisations.

L'enjeu principal de ces systèmes réside sur la stratification du volume d'eau stocké, un ballon non stratifié subit des mélanges, par conséquent le temps nécessaire pour atteindre une certaine température est plus important que pour un ballon stratifié. Cette stratification est notamment influencée par le rapport entre la hauteur et le diamètre (H/D). D'après **[LAVA1977]** et **[CABE2006]** pour obtenir un haut degré de stratification sans pertes thermiques excessives vers l'ambiance, un rapport de forme entre 3 et 4 est raisonnable. Cependant, d'après **[AEEI2008]** pour un stockage saisonnier avec un nombre de charges/décharges moins fréquent, il est conseillé de prendre un rapport H/D de 1. S'il n'est pas possible de travailler sur le rapport H/D, d'autres techniques sont envisageables, elles sont présentées en Annexe 3.

Plusieurs types de modélisations qui permettent une prise en compte plus ou moins précise du comportement du stockage sont disponibles dans la littérature : modèle à couches, modèle CFD, modèle zonal… Seules deux modélisations appartenant aux modèles à couches, qui seront reprises par la suite, sont présentées : le modèle de ballon idéalement brassé et le modèle avec brassage des couches.

Modèle de ballon idéalement brassé :

Dans ce modèle, la température du fluide est uniforme et varie en fonction du temps. Le stockage peut-être chargé ou déchargé via les différents puisages et échanges avec l'ambiance. Le bilan thermique est le suivant :

$$\rho V Cp \frac{dT}{dt} = Q_e * Cp * (T_e - T) - UA(T - T_{amb}) \quad (1.50)$$

Modèle avec brassage des couches

Ce modèle consiste à diviser le ballon en N couches isothermes de volume constant. Il est supposé que les zones d'entrées et de sorties des fluides sont imposées par l'utilisateur. Le modèle se base sur le bilan thermique de chacune des N couches. Le bilan énergétique d'une couche i peut s'écrire sous la forme suivante :

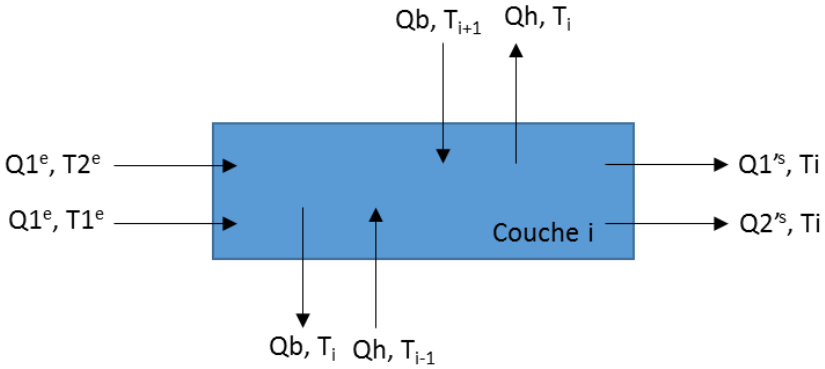


Figure 18 : Modélisation des échanges dans une couche du stcokage

$$\rho V_i \frac{dT_i}{dt} = Q_1^e Cp_1^e T_1^e + Q_2^e Cp_2^e T_2^e - Q_1'^s Cp_1'^s T_i + Q_2'^s Cp_2'^s T_i + Q_b Cp_b (T_{i+1} - T_i) + Q_h Cp_h (T_{i-1} - T_i) \quad (1.51)$$

Ensuite le mélange entre les zones est effectué. Si une zone i est plus chaude que la zone supérieure (i+1), les deux zones se mélangent. L'algorithme compare la température de la zone à toutes celles des zones qui lui sont supérieures. Jusqu'à obtenir une stratification du ballon de la température la plus froide à la température la plus chaude. De nombreux modules sous TRNSYS se basent sur ce principe (types 60, 531, 4...) **[TRNS2014]**. Le modèle de la RT2012 se base également sur cette modélisation en considérant 4 couches pour le stockage.

A partir de ces bilans thermiques, il est possible de déterminer l'énergie stockée pour le stockage dans de l'eau. Les modélisations présentées seront reprises lors de l'élaboration et la validation du modèle, c'est alors que le choix du nombre de couches sera effectué.

b. Stockage géothermique

La géothermie peut être vue comme un système de récupération de l'énergie mais également comme un système de stockage. Il existe plusieurs types de géothermie : la géothermie de faible profondeur, la géothermique de moyenne profondeur et la géothermie de grande profondeur. Ces différents types de géothermie sont présentés en Annexe 4. Dans cette partie, seule la modélisation de la géothermie verticale est présentée, la géothermie horizontale a été écartée car trop contraignante dans des projets de bâtiments collectifs. L'objectif de cette partie n'est pas de proposer une revue bibliographique de toutes les modélisations possibles de sondes géothermiques mais de déterminer parmi les différents modèles, les plus appropriés à la problématique de ce projet. L'objectif est de proposer des modèles d'échangeurs verticaux qui pourront être couplés à des modèles de PAC. Les modèles d'échangeurs doivent prendre en compte les sollicitations thermiques de courtes durées pour étudier le comportement de la PAC et également tenir compte de l'injection ou du prélèvement de chaleur sur une longue durée afin d'évaluer les performances annuelles et de s'assurer de la pérennité du système.

La modélisation des échangeurs géothermiques peut être vue comme la combinaison de deux modélisations : la modélisation analytique du comportement du sol et la modélisation des transferts dans les puits géothermiques.

Les modèles analytiques d'échange dans le sol :

Trois modèles sont identifiés dans la littérature : le modèle de la source linéique finie, le modèle de la source linéique infinie et le modèle cylindrique infinie. Pour plus de détails sur ces modèles, se référer au chapitre 1 des travaux de Philippe Mickael **[PHIL2010]**. L'objectif est de préciser le domaine d'utilisation de ces modèles à flux imposés afin d'utiliser le modèle qui correspond au champ d'application déterminé ci-dessus. Pour cela, Philippe et al. **[PHIL2009]** proposent un graphique permettant de déterminer le modèle le plus approprié pour le calcul de la température de paroi du forage en fonction de la durée du prélèvement thermique et de l'écart par rapport à la solution exacte. Les courbes sont calculées pour une sonde de 100m, de diamètre 0,05m et pour un sol classique (λ=2W/m.K, a=0,53 10^-6 m²/s, T0=8°C). Si un écart de 2% est toléré par rapport aux modèles de référence le graphique obtenu donne les résultats suivants :

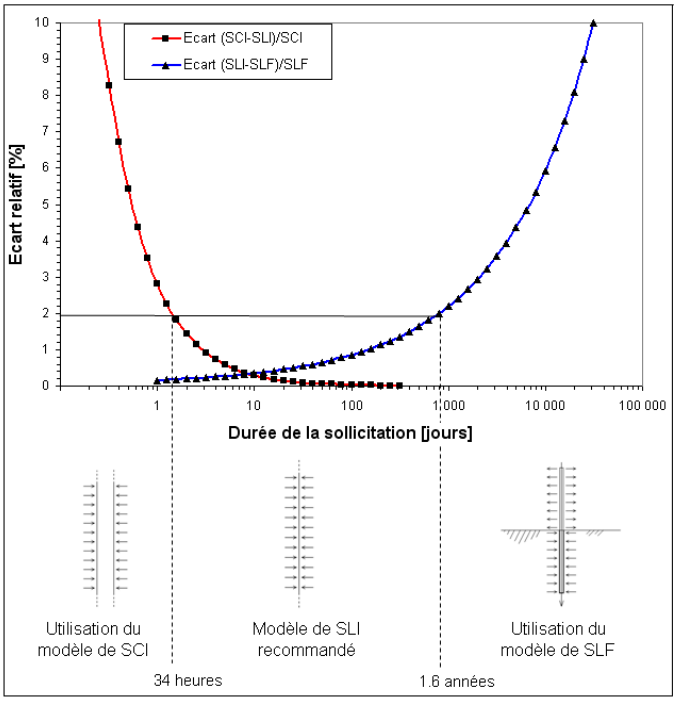


Figure 19 : Ecart du modèle utilisé par rapport à la solution exacte en fonction de la durée de sollicitation

D'après ce graphique, il est préférable d'utiliser le modèle de sources cylindriques infinies pour les sollicitations de courtes durées. Ce modèle a été développé par Ingeoll et al. **[INGE1954]**. La solution

est obtenue en résolvant l'équation de la chaleur avec une condition de flux imposé en surface du cylindre représentant le forage géothermique.

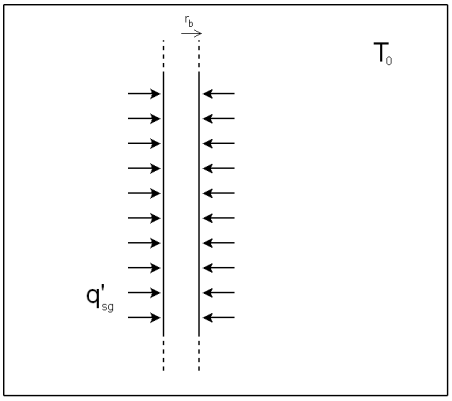


Figure 20 : Représentation des flux imposés en surface

La solution s'exprime à l'aide de la fonction de Bessel :

$$T(F_0,p) - T_0 = \frac{q'_{sg}}{\lambda} G(F_0,p) \tag{1.52}$$

$$G(F_0,p) = \frac{\frac{1}{\pi^2}\int_0^\infty (e^{-\beta^2 F_0} - 1)}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} [J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta) - Y_0(p\beta)] \frac{d\beta}{\beta^2} \tag{1.53}$$

$$F_0 = \frac{at}{r_b^2} \qquad p = \frac{r}{r_b} \tag{1.54}$$

Cette fonction G est complexe à calculer, des corrélations sont donc proposées par Bernier **[BERN].**

Modèle de transferts thermiques dans les pieux géothermiques :

La résistance thermique totale d'un pieux est composée de la résistance thermique de la tuyauterie qui inclue les pertes par conduction dans la paroi du tuyau et celles par convection et de la résistance du puit pour tenir compte de la conductivité thermique du coulis et de la configuration de la tuyauterie à l'intérieur du puit. Une vue en coupe du pieux est représentée ci-dessous :

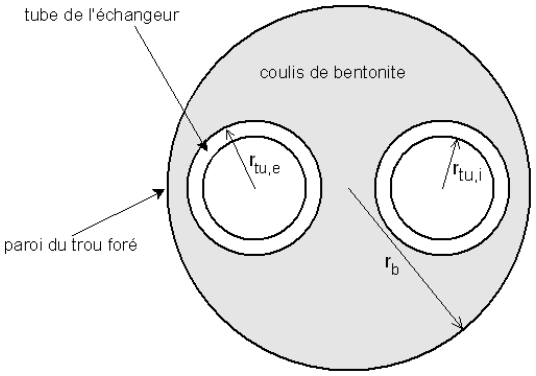


Figure 21 : Section du trou foré équipé d'un tube en U

$$R_{gloable} = R_{conv} + R_{cond} + R_b \tag{1.55}$$

La résistance de convection est définie par l'équation (1.56)

$$R_{conv} = \frac{1}{4 * \pi * r_{tu,i} * h_i} \tag{1.56}$$

Le coefficient de convection du fluide dans la tuyauterie hi est calculé avec les nombres de Reynolds, Prandtl et Nusselt. En fonction de l'écoulement les corrélations suivantes sont utilisées :

Ecoulement turbulent : Re>5000 et 0,6<Pr<100

$$Nu = 0.021 * Re^{0.8} * Pr^{0.43} \quad (1.57)$$

Ecoulement laminaire : Re<5000

$$Nu = 1.86 * (Re\mathrm{Pr})^{1/3} \left(\frac{r_{tu,i}}{H_{puits}}\right)^{1/3} \quad (1.58)$$

La résistance de conduction est définie par l'équation (1.59)

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_{tu,e}}{r_{tu,i}}\right)}{4 * \pi * \lambda} \quad (1.59)$$

Il faut également définir la résistance de conduction entre la tuyauterie et la jonction du sol. De nombreuses expressions plus ou moins complexes sont proposées par Paul **[PAUL1996]**, Hallström **[HELL1991]** et Bennet et al. **[BENN1987]**.

Le modèle de Paul est facile à implémenter car il propose une corrélation à partir d'essais expérimentaux.

$$R_b = \frac{1}{\beta_0 \left(\frac{r_b}{r_{tu,e}}\right)^{\beta_1} \lambda_{coulis}} \quad (1.60)$$

Cas	β0	β1
A	20,1	-0,9447
B	17,44	-0,6052
C	21,91	-0,3796

Tableau 12 : Paramètres de l'équation (1.60)

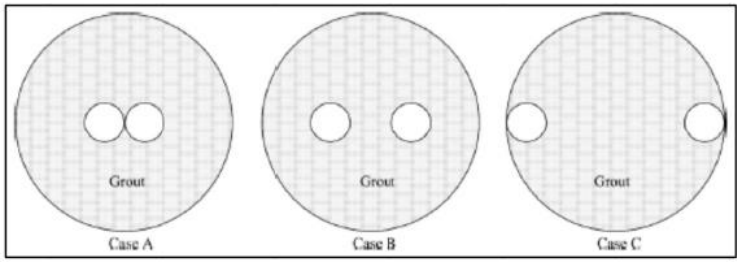


Figure 22 : Configuration des puits pour le calcul des résistances par la méthode de Paul

Connaissant cette résistance, il est possible d'effectuer un bilan thermique.

$$P_{stockée} = Q_{fluide} * Cp_{fluide}(T_s(t) - T_e(t)) \quad (1.61)$$

La variation de la température entre la sortie et l'entrée est de l'ordre de quelques degrés. La température moyenne est donc la suivante :

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (1.62)$$

Le bilan est le suivant :

$$T_m(t) = T_{paroi}(t) - P_{stockée} * R_{globale} \quad (1.63)$$

Modèles numériques :

Les modèles numériques permettent de représenter plus finement les échanges géothermiques. Cependant, ils présentent un inconvénient, leur temps de calcul. Trois modèles numériques majeurs existent. Les modèles d'Eskilson **[ESKI1987]**, de Yavuzturk **[YAVU1999]** et d'Hellström **[HELL1989]**. Le modèle DST d'Hellström traite de manière générale les problèmes de

stockage de chaleur dans les sous-sols. Ce modèle est assez complexe à mettre en œuvre pour le calcul, de plus il présente une limite car il fait l'hypothèse d'une répartition cylindrique des échangeurs géothermiques. Cependant, ce modèle a été validé expérimentalement **[THOR1997]** et est utilisé pour valider de nouvelles techniques de calcul **[BERN2001], [BERN2004].** C'est ce modèle qui est également utilisé sous TRNSYS avec le type 557.

La modélisation présentée sera celle réutilisée pour calculer l'énergie stockée ($E_{stockée}$). Le modèle numérique DST sera utilisé pour valider le modèle simplifié.

L'ensemble des modélisations qui permettront de calculer les deux nouveaux termes du bilan des consommations viennent d'être présentées. Certaines modélisations reconnues dans la littérature seront utilisées pour valider le modèle et d'autres seront intégrées dans la modélisation proposée.

Cette partie a permis d'identifier des méthodes de calculs permettant de caractériser l'ensemble des termes de la nouvelle équation bilan proposée en introduction. Elle a également permis de mettre en avant la diversité des systèmes de récupération et de stockage. C'est cette diversité qui permet une adaptabilité des solutions en fonction des projets. Il est donc nécessaire de trouver une méthode de modélisation globale qui permettra d'appréhender tous les systèmes et qui pourra ainsi proposer la ou les meilleures solutions. Des méthodes de dimensionnement par système et globale sont déjà proposées, leur étude fait l'objet de la partie suivante.

IV. Etat de l'art sur les méthodes de choix et de dimensionnement des systèmes

1. Les approches par système

Différents systèmes de récupération, de stockage et de génération ont été présentés précédemment. Il est maintenant possible de travailler sur la problématique majeure qui est le dimensionnement de ces systèmes. Il existe actuellement de nombreuses méthodes pour dimensionner chaque système individuellement, quelques méthodes vont être présentées.

a. Dimensionnement des échangeurs d'eaux usées

Chaque industriel a développé une méthode de dimensionnement pour ces systèmes dont l'accès est souvent difficile. Power Pipe diffuse quant à lui un guide de dimensionnement. Il repose sur le calcul du débit maximal et sur la capacité maximale du Power Pipe qui est soit de 19L/min soit de 30L/min en fonction des systèmes **[SOLENOVE]**. Le système ERS Biofluide est quant à lui dimensionné de sorte que la cuve de stockage des eaux usées ait un volume supérieur ou égal à deux fois le puisage maximal journalier calculé à partir de la RT2012.

b. Dimensionnement solaire thermique

Le dimensionnement du solaire thermique passe dans la majorité des cas par le recours à des logiciels spécialisés, il faut dimensionner la surface de capteur ainsi que le volume de stockage solaire. L'outil le plus répandu est la méthode SOLO2000 développée par le CSTB qui propose un calcul mensuel **[SOLO1992]**. Des modèles dynamiques comme TRANSOL (issu de TRNSYS) existent également mais sont moins utilisés. La méthode de dimensionnement Solo repose sur la connaissance du besoin en énergie et du rayonnement solaire. En fonction des panneaux solaires sélectionnés un taux de couverture solaire est fourni. L'objectif étant d'avoir un taux de couverture assez élevé (compris entre 40% et 70% généralement). Le choix du dimensionnement prendra également en considération les contraintes économiques et l'espace disponible.

Dans le cas d'une installation collective, une pré-dimensionnement peut-être réalisé en prenant les hypothèses suivantes :

- un mètre carré de capteur est nécessaire pour un besoin journalier d'ECS de 70 litres, soit une surface de panneaux :

$$S = Vecs_{journalier}/70$$

- un volume de 50 litres est nécessaire par mètre carré de panneaux pour le stockage, soit un volume :

$$Vstockage_{solaire} = 50 * S$$

c. Dimensionnement géothermique

En Europe, la règle de dimensionnement la plus couramment utilisée est celle de la directive allemande VDI4640 **[VDIG2001]**. Cette méthode se base sur le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge et sur la typologie du sol ainsi que la puissance maximale sollicitée par le générateur. En utilisant le tableau 13, il est alors possible de déterminer la longueur de la sonde :

Conductivité thermique (W/m.K)	Taux d'extraction spécifique	
	1800h eq. À qch	2400 h eq à qch
λ<1,5	25	20
1,5<λ<3	65	50
λ>3	84	70

Tableau 13 : Ratios de puissances spécifiques extraits de la VDI 4640 pour les sondes verticales (valables pour des puissances inférieures à 30kW)

En Amérique du Nord, une règle plus élaborée est utilisée. Elle est proposée dans le manuel de l'ASHRAE **[ASHR2007].** Elle est basée sur une équation de dimensionnement qui a été reformulée par BERNIER **[BERN2001]**. L'équation utilisée est la suivante :

$$L = \frac{q_h R_b + q_y R_{10_y} + Q_m R_{1m} + q_h R_{6h}}{T_m - (T_g + T_p)} \quad (1.64)$$

Tm est la température moyenne du fluide dans le forage, Tg est la température du sol non perturbé et Tp une correction qui intervient lorsqu'un champ de sonde est installé. Qv, qm et qh (en W) représentent respectivement, le prélèvement thermique au sol moyen annuel, le maximum de prélèvement mensuel et le prélèvement maximal horaire. R10y, R1m et R6h sont respectivement les résistances thermiques du sol correspondant aux périodes de 10 ans, 1 mois et 6 heures. Un outil Excel est proposé par Philippe et al. **[PHIL2010]** afin de réaliser le calcul.

Actuellement, il n'existe pas de règles de dimensionnement pour le stockage en cuve, une étude est menée pour chaque projet. Quant à l'utilisation de la batterie froide pour réchauffer l'eau, elle est novatrice. Habituellement, c'est l'air qui véhicule l'énergie soit pour chauffer soit pour climatiser. Par conséquent, il n'existe pas de méthode de dimensionnent propre à ce type d'utilisation. Il est évident que comme pour les batteries froides le débit d'air et le débit d'eau seront les éléments essentiels du dimensionnement.

Malheureusement ce type d'approche ne permet pas d'avoir une vision globale. Les interactions entre les différents systèmes ne peuvent être appréhendées correctement. Une étude des quelques méthodes globales disponibles actuellement est proposée ci-dessous.

2. Les approches globales

L'utilisation des énergies renouvelables et fatales ne fait que croitre ces dernières années. C'est une des réponses apportées pour réduire l'utilisation des énergies fossiles et pour répondre aux contraintes environnementales. En plus des problèmes d'intégration et de coût, il est difficile de faire le bon choix face aux nombreux critères à prendre en compte lors du dimensionnement. Le problème ne devient que plus grand lorsque les systèmes sont couplés entre eux afin d'atteindre de meilleurs niveaux de performances. En effet, comment trouver la meilleure solution au vue des nombreux critères et des contraintes du projet. Des travaux ont été menés dans le but d'apporter des premières réponses à ces questions.

Deux types d'approches se distinguent : des approches sur les systèmes et des approches sur les bilans énergétiques. Des outils ont été développés ou ont évolués pour s'adapter plus ou moins au dimensionnement.

EnergyPlus [CRAW2001] et TRNSYS [TRNS2014] :
Ces deux logiciels reposent sur des modèles de séries chronologiques. Ils permettent de simuler un ensemble de systèmes du bâtiment. Ils prennent en compte des systèmes de stockage en cuve, géothermique, des panneaux solaires thermiques, photovoltaïques et hybrides… En règle générale, le nombre et la précision des données d'entrée nécessaires pour tous ces modèles sont tellement élevés

qu'ils ne sont pas conçus pour être mis à la disposition des ingénieurs thermiques et des architectes. Ils sont bien trop chronophages à l'utilisation. Ils peuvent tout de même être couplés à des logiciels comme GenOpt **[WETT2008]** pour faire de l'optimisation. Cependant, ils ont été conçus à l'origine pour faire de la simulation de modèle et cela s'en ressent car la masse de données ne permet pas une approche globale lors de l'optimisation. Ces types d'outils serviront à valider le modèle développé.

RETScreen International [RETS2005]:
RETScreen International repose sur un modèle statistique qui permet d'évaluer les technologies d'énergies renouvelables. C'est un outil qui a été élaboré par le ministère Canadien. Il permet de modéliser l'énergie éolienne, photovoltaïque, la biomasse, le chauffage solaire… L'outil se base sur 5 feuilles de calculs. Il permet notamment de connaître le modèle énergétique, de faire l'analyse des coûts et des études de sensibilité et de risques. Il ne propose pas un dimensionnement mais permet de faire une étude poussée et assez rapide de la solution que ce soit sur le plan énergétique ou financier.

HYBRIDS :
HYBRIDS repose sur une analyse mensuelle. Il s'applique à des sources d'énergies renouvelables et est développé par Solaris Homes. Il exige de nombreuses connaissances sur les efficacités et les propriétés des différents convertisseurs d'énergie ce qui le rend complexe d'utilisation. De plus, il ne permet de faire qu'une simulation à la fois. Il est ensuite possible de faire une évaluation de ces simulations suivant un critère d'optimisation. L'étude d'un hôtel réalisé avec cet outil **[DALT2008]** s'est avérée concluante car les résultats obtenus pour le dimensionnement sont semblables à ceux obtenus avec HOMER **[NREL2005]**.

Hybrid2 [HYBR1996] :
Hybrids2 est un logiciel qui repose sur des séries chronologiques et qui permet d'effectuer des analyses à long terme. C'est un outil développé par Renewable Energy Research Laboratory of Massachusetts. Il s'adapte particulièrement aux systèmes électriques et aux générateurs diesels. Il ne tient pas compte des courtes durées et donc des interactions entre les différents systèmes.

Le CETHIL travaille également depuis 2006 sur ces approches. Joseph Virgone et son équipe travaille sur la commande des systèmes multi énergies pour les bâtiments à hautes performances énergétiques **[VIRG2006]**. L'objectif est de proposer des solutions de commande des systèmes sur des installations existantes privilégiant les énergies renouvelables mais également de proposer un outil de conception d'un ensemble bâtiment-systèmes pour définir les conditions des meilleurs couplages entre demande et offre d'énergie. Deux thèses ont été menées sur ce type de problématiques.

Les travaux menés par Fabrizio s'intéressent aux systèmes multi-énergies (gaz, électricité, hydrogène, solaire, éolien, biomasse…) **[FABR2008]**. Il vise à développer un outil de modélisation des systèmes multi énergies qui prend en compte tous les flux d'énergies dans le bâtiment et qui puisse se référer à une configuration ouverte et non pas à une unique typologie de systèmes. Pour cela, il se base sur la méthode d'analyse du *energy hub* qui permet de prendre en compte le couplage entre demande et offre de l'énergie. Il propose une modélisation de type boites noires avec pour chaque composant une puissance en entrée et une puissance en sortie. Il propose des algorithmes simplifiés basés sur les données des fabricants qui sont l'efficacité ou le COP dans la majorité des cas. Le calcul se base donc sur le bilan en puissance nominale et sur le bilan en énergie annuelle.

$$P_{in} = D_a P_{out} \tag{1.65}$$

$$E_{in} = D_s E_{out} \tag{1.66}$$

Dans le cas d'une analyse mensuelle, dans chacune des matrices D se trouve les performances saisonnières et les performances nominales des systèmes, ainsi qu'un ensemble de variables de décision εi qui varient entre 0 et 1 et qui sont identiques dans les 2 matrices D. C'est sur ces variables que l'optimisation se fait, à partir d'objectifs économiques, énergétiques et environnementaux. Grace aux valeurs de ε obtenues, il est possible de remonter à une combinaison de systèmes. Malheureusement, ce type d'approche ne permet pas de prendre en compte le stockage. Il propose également une approche horaire afin de tenir compte de l'intermittence des systèmes et de la variabilité de leur efficacité. Ainsi, les performances des systèmes sont des performances horaires à minima, les coefficients ε sont quant à eux fixés. Il est possible de se référer aux 2 exemples du chapitre 7 des travaux de Fabrizio **[FABR2008]** pour plus de détails. Le stockage pourrait être intégré grâce à

l'approche horaire mais les travaux de Fabrizio ne prévoient pas ce type d'approche. De plus, dans son état actuel, le modèle ne permet pas de prendre en compte les systèmes de récupération sur les énergies fatales du bâtiment.

Catalina propose une approche multicritères pour résoudre les problèmes de choix et d'optimisation des configurations **[CATA2009].** Il se base sur une modélisation du bâtiment construite avec des polynômes qui permettent de connaître les consommations annuelles et mensuelles. Puis, les méthodes de dimensionnement des différents systèmes (solaire thermique, solaire photovoltaïque, géothermie sur pompe à chaleur et biomasse) ont été référencées ainsi que des analyses économiques et environnementales. Un modèle est ainsi proposé et permet de faire des analyses multicritères avec la méthode ELCETRE III. Il propose de se limiter à 6 configurations pour le solaire thermique et 6 configurations pour le solaire photovoltaïque avec l'utilisation d'un générateur. Il est également possible d'intégrer d'autres systèmes comme la géothermie mais le dimensionnement doit-être fait préalablement. Au total 144 combinaisons peuvent être envisagées. Un outil appelé ECO-Sol a été élaboré pour mettre en œuvre ce type d'approche. Malheureusement, ce type d'approche ne se limite qu'à une combinaison de solutions qui intègre 6 possibilités en solaire thermique et 6 possibilités en solaire photovoltaïque. L'objectif d'une optimisation globale des systèmes est encore loin. De plus, les bilans sont faits de façon annuelle ou mensuelle ce qui ne permet pas d'appréhender correctement l'intermittence des énergies pour le dimensionnement.

En règle générale, l'optimisation est restreinte à un certain type de systèmes car de manière globale le nombre de données nécessaires, pour effectuer une simulation et une optimisation, est trop élevé. Il était envisageable d'utiliser de tels outils pour des projets ponctuels et de faire appel à des spécialistes. Cependant, l'intégration des énergies renouvelables et fatales devient courante, il n'est donc pas envisageable d'avoir recours à de tels outils pour de nombreuses études. C'est pourquoi, il est nécessaire de développer un outil d'aide au choix et au dimensionnent des systèmes. C'est ce à quoi, les chapitres suivants chercheront à répondre. Une analyse plus poussée d'une modélisation est effectuée sous TRNSYS afin de comprendre les différents phénomènes. Il sera alors possible de proposer un modèle simplifié, facile d'utilisation et adapté à une méthode d'optimisation qui lui sera intégrée.

V. Conclusion

Ces travaux visent à faire évoluer le bilan des consommations en y intégrant les énergies fatales et renouvelables ainsi que le stockage. Dans un premier temps, les différents potentiels de récupération ont été caractérisés, puis le lien avec les systèmes et leurs modélisations a été effectué. Il existe de nombreux modèles plus ou moins complexes qui seront repris pour valider le modèle ainsi que pour le développer.

Les systèmes sont très nombreux et diversifiés ce qui permet une réelle adaptabilité des solutions en fonction des projets. Il est donc nécessaire de proposer une modélisation globale qui permet d'appréhender le projet dans sa globalité et non par système. C'est ce manque d'approche globale qui a été mis en avant dans la seconde partie de ce chapitre. L'optimisation est restreinte à un certain type de systèmes ou bien le nombre de données à saisir rend le travail fastidieux et chronophage. C'est dans ce contexte que le travail proposé prend tout son sens.

Afin de choisir et de dimensionner les différents systèmes, un modèle et une méthode d'optimisation sont construits dans les chapitres qui suivent. Les différents choix sont validés avec le logiciel TRNSYS qui offre de nombreuses possibilités bien que son utilisation soit fastidieuse et chronophage. Des modélisations sont également réalisées en amont avec le logiciel TRNSYS dans le chapitre 2 afin de comprendre le comportement des différents systèmes.