



HAL
open science

Développement et mise en application d'un cadre de modélisation pour l'analyse des risques appliqués aux systèmes constructifs

Manuel Bazzana

► **To cite this version:**

Manuel Bazzana. Développement et mise en application d'un cadre de modélisation pour l'analyse des risques appliqués aux systèmes constructifs. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENA032 . tel-00701440

HAL Id: tel-00701440

<https://theses.hal.science/tel-00701440>

Submitted on 25 May 2012

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie civil et sciences de l'habitat**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Manuel BAZZANA

Thèse dirigée par **Gérard SAUCE**

Préparée au sein du **Centre scientifique et technique du bâtiment** et du **Laboratoire optimisation de la conception et ingénierie de l'environnement** dans l'École Doctorale **Science et ingénierie des systèmes, de l'environnement et des organisations**.

Développement et mise en application d'un cadre de modélisation pour l'analyse des risques appliquée aux systèmes constructifs

Thèse soutenue publiquement le **27 octobre 2011**, devant le jury composé de :

M. David BRISSAUD

Professeur, Université de Grenoble, Président.

M. Khaldoun ZREIK

Professeur, Université Paris 8, Rapporteur.

M. David BIGAUD

Professeur, Université d'Angers, Rapporteur.

Mlle Aurélie TALON

Maître de conférences, Université Blaise Pascal Clermont II, Examinatrice.

M. Michael A. LACASSE

Senior Research Officer, Institute for Research in Construction - National Research Council Canada, Examineur.

M. Gérard SAUCE

Maître de Conférences - HDR, Université de Savoie, Directeur de thèse.

M. Julien HANS

Chef de Division, Centre scientifique et technique du bâtiment, Invité.



Avant propos

Ma gratitude va en premier lieu à mes encadrants : mon directeur de thèse, Gérard Sauce, pour son accompagnement et son soutien, ainsi que Julien Hans, pour son support sans faille et la confiance qu'il s'est entêté à m'accorder tout au long de ces années de travail.

Ces travaux sont également le fruit d'échanges et de contributions de nombreuses personnes qu'il m'est impossible de toutes citer ici. Un grand merci en premier à Ludovic Laé, pour ses nombreux conseils et surtout pour avoir permis la transformation d'un brouillon conceptuel en un outil fonctionnel, ainsi qu'aux autres membres de la société Bassetti, notamment Hong Yu Wang et Ivan Logre. Un très grand merci également à Francis Grannec, Quentin Bercher et Lélia Floch – dans l'ordre d'apparition – pour le boulot qu'ils ont vaillamment abattu malgré des consignes parfois floues. Pierre Ropars doit également être mentionné ici : il a codé vite et bien les algorithmes qui m'ont permis d'analyser les premières fournées de résultats !

J'ai également bénéficié du support et des contributions de Michael Lacasse, que je remercie de m'avoir accueilli à l'IRC, avoir patiemment relu et annoté mes écrits et avoir accepté de faire partie de mon jury.

Cette thèse a été préparée au sein du Centre scientifique et technique du bâtiment de Grenoble, et je tiens à remercier tout le personnel qui m'a offert un excellent cadre de travail et une ambiance chaleureuse, notamment l'équipe environnement au sein de laquelle je continue à en apprendre tous les jours. Une mention spéciale à mes « cobureaux » successifs Christophe, Sébastien et Hélène qui m'ont vaillamment supporté. Merci Seb pour ces nombreuses discussions sur le pourquoi du comment qui m'ont fait avancer.

Merci également aux Ex Viganais, assimilé(e)s et pièces rapporté(e)s pour les moments de détente, les racliflettes crevette-curry et les apéros. Merci à Fran et Mapi d'être eux-mêmes et aussi pour le pied à terre dans la plus belle ville du monde.

Je tiens également à remercier tous les membres de ma famille, en premier lieu mes parents et ma sœur, pour leurs encouragements et leur assistance dans les moments de doutes.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans un dernier mot pour Anne, qui m'a soutenu, parfois porté et souvent supporté sur cette fin de thèse.

Résumé

Les outils logiciels d'analyse des risques contribuent à la maîtrise de la qualité des produits, notamment en permettant l'identification de leurs modes de défaillances potentiels. Le travail de thèse présenté dans ce mémoire porte sur la définition d'un cadre de modélisation générique adapté aux produits du bâtiment et destiné à servir de base pour le développement d'un tel outil. Ce cadre de modélisation vise à permettre une représentation qualitative et unifiée des systèmes constructifs et de leurs modes de fonctionnement. Les différents objets qui le constituent ainsi que leurs articulations permettant de réaliser l'étude d'un produit sont décrits et illustrés. Un prototype d'outil fonctionnel est ensuite développé sur la base de ces travaux, puis mis en application au travers de plusieurs études.

Abstract

Software tools for risk analysis contribute to the quality control of products, notably by allowing the identification of their potential failure modes. The thesis work presented in this dissertation concerns the definition of a generic modeling framework suitable for building products and intended to serve as basis for the development of such a tool. This modeling framework is intended to allow a qualitative and unified representation of building systems and their modes of operation. The various objects that constitute it and their articulations are described and illustrated. A functional prototype tool is then developed on the basis of our work, and implemented through several studies.

Table des matières

Glossaire	12
Introduction générale.....	15
Introduction.....	16
Objectifs des travaux.....	19
Partie A . État de l'art	22
A.1. Pérennité des performances : État de l'art des recherches, méthodes et outils existants	23
A.1.1. Généralités.....	23
A.1.2. Outils et méthodes pour le bâtiment	24
A.1.3. Applications de l'AMDEC au domaine du bâtiment	28
A.2. Analyse des risques assistée par ordinateur.....	32
A.2.1. Principes généraux.....	32
A.2.2. Modélisation et simulation	34
A.2.3. Exemples d'outils et travaux	46
A.2.4. L'outil CPAO	50
A.3. Analyse critique et étude préliminaire	53
A.3.1. Limites de l'outil existant CPAO	53
A.3.2. Choix d'un formalisme de représentation des systèmes.....	61
A.3.3. Conclusions	64
Partie B . Développement d'un cadre de modélisation.....	67
B.1. Démarche	68
B.1.1. Description générale du cadre de modélisation	68
B.2. Éléments clefs du cadre de modélisation.....	72
B.2.1. Description des flux et milieux.....	72
B.2.2. Description d'un composant	73
B.2.3. Représentation des ports	76
B.2.4. Représentation des liaisons	78

B.2.5. Marqueurs fonctionnels	81
B.2.6. Représentation des dégradations	82
B.3. Utilisation du cadre de modélisation.....	85
B.3.1. Représentation structurelle d'un système	85
B.3.2. Fonctionnement nominal d'un système.....	87
B.3.3. Fonctionnement défaillant d'un système	91
B.3.4. Construction d'un graphe d'état.....	94
B.4. Développement d'un prototype d'outil.....	99
B.4.1. Fonctionnalités du prototype	100
B.4.2. Construction d'une arborescence de flux	108
Partie C . Mise en application du cadre de modélisation	113
C.1. Évaluation du cadre de modélisation	114
C.2. Étude d'un capteur photovoltaïque	115
C.2.1. Cadre de l'étude.....	115
C.2.2. Représentation du système	116
C.2.3. Résultats de l'étude	123
C.2.4. Analyse des résultats et propositions	127
C.2.5. Conclusions de l'étude du capteur photovoltaïque	129
C.3. Enrichissement de la base de données de dégradation.....	130
C.3.1. Description des matériaux.....	130
C.3.2. Données de dégradations disponibles dans la littérature	133
C.3.3. Analyses et propositions	136
Conclusions et perspectives	140
Rappel des objectifs	141
Évaluation du cadre de modélisation	142
Évaluation du prototype.....	142
Comparaisons avec l'outil CPAO.....	144

Conclusions générales et perspectives.....	146
Bibliographie.....	148
Annexes	154
Annexe 1 : Représentation d'une famille de flux.....	155
Annexe 2 : Logs de résultats : extraits des modes de dégradation du capteur photovoltaïque.	165
Annexe 3 : liste des modes de dégradations.....	173
Annexe 4 : liste des flux	189
Annexe 5 : Proposition de signification des principaux types de liaisons.	193

Table des figures

Figure A-1. Liste des facteurs.....	25
Figure A-2. (a) - Représentation graphique d'un système markovien - (b) Matrice de transition équivalente.	26
Figure A-3. Principe de l'évaluation de la durée de vie des produits de construction, d'après (Talon, 2007).....	31
Figure A-4.Espace qualitatif décrivant la température d'une substance d'après (Bredeweg, 2006).....	36
Figure A-5. Espace qualitatif décrivant la variable « Degré d'humidité ».....	37
Figure A-6. Graphe causal décrivant les influences entre variables - modèle qualitatif de dégradation du béton. D'après (Lair 2000b).....	38
Figure A-7. Représentation d'une décomposition fonctionnelle via une approche à base de flux. Adapté de (Teoh, 2004).....	40
Figure A-8. Taxonomie des flux selon (Stone, 2000)	41
Figure A-9.Extrait du Functional Basis comportant les définitions des flux décrites par les auteurs. D'après (Stone, 2000).	42
Figure A-10. Typologie des fonctions de base du MFM. Adapté de (van Paassen, 1999).	42
Figure A-11. Schéma d'une « mass-flow structure » ainsi que le schéma du système équivalent. Adapté de (van Paassen, 1999).....	43
Figure A-12. Structure hiérarchique fonctions/comportement.	45
Figure A-13. Représentation du résultat d'une simulation fonctionnelle sous CPAO (étape de migration)	56
Figure A-14. Représentation d'une canalisation à l'aide de deux composants.....	57
Figure B-1.Utilisation des modèles de systèmes et de composants	71
Figure B-2. a) Modèle de classe flux et milieux et b) exemple de milieux et de flux associés	72
Figure B-3. a) principaux types de flux, b) exemple et relations entre flux.....	73
Figure B-4. Diagramme de classe simplifié orienté vue composant.....	74
Figure B-5. Représentation d'un modèle de composant.....	75

Figure B-6. Principales classes de matériaux	75
Figure B-7. Définition des ports de deux modèles de câbles conducteurs exprimés à différents niveaux de granulométrie a) mono-composant et b) mono-matériau.	77
Figure B-8. Définition des ports	77
B-9. Prise en compte des matériaux constitutifs des ports : a) modèle de classe implémenté et b) représentation d'un modèle de composant.....	78
Figure B-10. a) Extraits de la typologie des flux et b) Typologie simplifiée des fonctions	79
Figure B-11. Liaisons d'un modèle de composant (vitrage).	80
B-12. Exemple d'assignation de marqueurs fonctionnels, extrait d'un système mur porteur.....	82
Figure B-13. Dégradations : Modèle de classe simplifié.	83
Figure B-14. Exemple de mode de dégradation.....	84
Figure B-15. Modèle de classe simplifié orienté vue système	85
Figure B-16. Représentation graphique du modèle d'un capteur PV d'après (Hans, 2007b)	86
Figure B-17. Propagation des flux à différentes échelles	87
Figure B-18. Représentation graphique des flux de rayonnement solaire et de courant électrique après propagation dans le modèle du capteur photovoltaïque. .	89
Figure B-19. Effets d'un mode de dégradation « fissuration du vitrage ».	92
Figure B-20. Effet d'un mode de dégradation à l'échelle composant (partie gauche) et à l'échelle système (partie droite)	94
Figure B-21. Comparaison entre graphes d'états et graphes événementiels de défaillance.....	96
Figure B-22. Capture d'écran du prototype	100
Figure B-23. Principales fonctionnalités du prototype	101
Figure B-24. Capture d'écran commentée du module de calcul.....	103
Figure B-25. Extrait de l'algorithme d'application des effets montrant une partie des règles mises en place pour l'application des effets de type 'stopper'.	104
B-26. Capture d'écran présentant le résultat de la première propagation des flux	105

Figure B-27. Structure des logs de résultats simplifiés (haut) et exhaustifs (bas)	106
Figure B-28. Hiérarchie des flux selon (Stone, 2000).....	108
Figure B-29. a) Extrait de la typologie des flux. b) Modèle de classe simplifié. c) Illustration des relations entre flux.	112
Figure C-1. Schéma du système « capteur photovoltaïque » tel qu'implémenté dans notre prototype	117
Figure C-2. Représentation du modèle de composant cellules photovoltaïques...	119
Figure C-3. Extrait du GED représentant les modes de défaillances du vitrage de protection. D'après (Hans, 2007b).	121
Figure C-4. Représentation des modes de dégradation implémentés dans le prototype.....	122
Figure C-5. Illustration du résultat de la propagation du flux « rayonnement solaire » provenant du milieu extérieur.....	124
Figure C-6. Illustration de la mise à jour d'un scénario de dégradation par le prototype et représentation du GED équivalent.	125
Figure C-7. Extrait de la classification des matériaux, telle qu'implémentée dans l'outil montrant la place du type « Polyamides ».....	131
Figure C-8. Extrait de la classification des matériaux, telle qu'implémentée dans l'outil montrant la place du type « Polyamides » après ajout des sous-types.	132
Figure C-9. Enchaînement de dégradations suite au phénomène de photo-oxydation	137

Table des tableaux

Tableau 1. Confrontation entre les résultats de la simulation qualitative et ceux du modèle probabiliste. D'après (Lair 2000b).	39
Tableau 2. Fonctionnalités de CPAO	59
Tableau 3. Tableau de synthèse des modes de représentation	66
Tableau 4. Principaux types de vieillissement des polymères et couplages, d'après Fayolle (Fayolle, 2005).....	133

Glossaire

Agent environnemental :

Sollicitation, de nature climatique, mécanique, chimique, ou humaine subie par un système constructif.

AMDE :

Analyse des modes de défaillances et de leurs effets.

AMDEC :

Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité.

Arbre des défaillances :

Représentation graphique et logique des combinaisons des causes de dégradations élémentaires des composants entraînant la défaillance des composants et du produit.

Arbre d'état :

Représentation exhaustive des états par lesquels passe un système suite à la recherche des modes de dégradation.

Composant (d'un système) :

Élément résultant de la décomposition d'un système en parties. Un composant représente une partie physique d'un système.

CPAO (Conception pérenne assistée par ordinateur) :

Logiciel d'aide à l'analyse des risques dédié aux composants d'ouvrage du bâtiment.

Criticité d'un scénario (de défaillance) :

Produit des critères d'éventualité d'apparition, de date de réalisation et de gravité de ce scénario pondéré par la croyance que l'on peut accorder aux valeurs prises par ces critères. D'après (Talon, 2006).

Défaillance :

Une entité constructive est défaillante lorsqu'au moins une ou une combinaison de ses fonctions principales atteint son seuil de défaillance. D'après (Talon, 2006).

Dégradation :

C'est une modification des propriétés ou de la géométrie de cette entité par rapport à ses propriétés ou à sa géométrie initiales. D'après (Talon, 2006). Cf. Mode de dégradation

Durabilité :

Aptitude d'un bâtiment ou de ses composants à assurer ses fonctions requises au delà d'une période spécifiée sous l'influence d'agents climatiques et d'usage prévus (Jernberg, 2004).

Durée de vie :

Période, débutant avec la mise en service, pendant laquelle un bâtiment ou ses différentes parties satisfont aux exigences de performance (Jernberg, 2004).

Milieux :

Les milieux constituent les frontières des systèmes étudiés. Ils peuvent être des environnements (environnement intérieur d'un ouvrage par exemple), ou d'autres parties d'ouvrage qui interagissent avec le système (p. ex. le bâti). Les milieux sont décrits par agrégation d'un ensemble de flux.

Flux :

Représentation des contraintes environnementales auxquelles les systèmes sont confrontés durant leur vie en œuvre et par rapport auxquelles la simulation fonctionnelle des systèmes constructifs est effectuée.

Fonction principale (FP):

Représentation en termes fonctionnels d'une part du service attendu par l'utilisateur, ce pour quoi le produit a été créé et d'autre part des limitations de la liberté de conception en raison de contraintes externes, telles que la protection de l'environnement, les normes de sécurité, les choix constructifs incontournables. (Talon, 2006).

Fonction secondaire (FS) :

Elles sont mises en œuvre pour satisfaire et réaliser les fonctions principales (Talon, 2006).

Les fonctions secondaires sont les fonctions qu'un système ou composant doit assurer pour pouvoir assurer ses fonctions principales.

Les relations fonctions principales / fonctions secondaires constituent une structure fonctionnelle (cf. structure fonctionnelle).

Fonctionnement défaillant :

Mode de fonctionnement d'un système contrevenant aux attentes du concepteur ou de l'utilisateur.

Fonctionnement nominal :

Mode de fonctionnement d'un système tel qu'attendu par le concepteur ou utilisateur.

Graphe événementiel de défaillance :

Représentation graphique de l'enchaînement et / ou de la concomitance des phénomènes (de dégradation) des composants au cours du temps conduisant à la défaillance du produit (d'après (Talon, 2006)).

Liaison :

Relation entre une fonction et un flux décrivant une partie du comportement fonctionnel d'un composant.

Marqueur fonctionnel :

Indicateur textuel appliqué à une liaison (cf. liaison) et permettant d'en préciser le caractère spécifique.

MFM (Multilevel flow modeling) :

Formalisme de représentation fonctionnel.

Mode de dégradation :

Manière dont un composant ou système se dégrade (cf. dégradation).

NUSAP (Numeral Unit Spread Assessment Pedigree) :

Mode de représentation de l'information prenant en compte les divers aspects de l'incertitude (d'après (Lair, 2000)).

Port :

Surface spécifique par laquelle un composant interagit avec les autres éléments d'un système.

Scénario (de dégradation)

Enchaînement de phénomènes de dégradation.

Structure fonctionnelle :

Ensemble de fonctions attribué à un système et organisé hiérarchiquement. La fonction de plus haut niveau est effective si les fonctions de niveau immédiatement inférieur le sont (et ainsi de suite).

Introduction générale

Introduction

[...] ces demeures, plutôt que bâties, sont nouées, tressées, brodées et patinées par l'usage ; au lieu d'écraser l'habitant sous la masse indifférente des pierres, elles réagissent avec souplesse à sa présence et à ses mouvements ; à l'inverse de ce qui se passe chez nous, elles restent toujours assujetties à l'homme.

Autour de ses occupants, le village se dresse comme une légère et élastique armure ; proche des chapeaux de nos femmes plutôt que de nos villes : parure monumentale qui préserve un peu de la vie des arceaux et des feuillages dont l'habileté des constructeurs a su concilier la naturelle aisance avec leur plan exigeant.

Claude Lévi-Strauss, *Tristes tropiques*.

L'extrait ci-dessus décrit, sur un mode autobiographique, les premières impressions de l'ethnologue à son arrivée dans un village isolé de Birmanie. Au-delà de l'évidente admiration envers un mode constructif dont l'auteur souligne et nous fait partager l'élégance, le lecteur impliqué dans les problématiques actuelles du domaine du bâtiment pourra s'essayer à quelques conjectures.

Ainsi, il est possible que les bâtisseurs des ouvrages évoqués – qui étaient peut-être leurs occupants - maîtrisaient l'ensemble du processus de construction, de la récolte des matières premières à la maintenance de l'ouvrage. Nous constatons que le contexte Français actuel est bien différent : la multiplicité des acteurs est la règle plutôt que l'exception.

Mais d'autres différences, plus fondamentales à nos yeux, méritent d'être évoquées. Dans tous les domaines techniques les connaissances progressent par essais et erreurs, le bâtiment ne faisant pas exception. L'évolution d'un système constructif peut donc être vue comme un processus de maturation au cours duquel ses fonctionnalités et performances, sa fiabilité ainsi que son acceptation de la part des différents acteurs vont évoluer. Nous pouvons ainsi distinguer les systèmes constructifs traditionnels, pour lesquels ce processus s'est stabilisé, des systèmes innovants. Dans la première catégorie on pourra sans doute ranger les ouvrages

birmanes et, en changeant de lieu et d'époque, la construction en béton armé ou les couvertures en bardage bois.

Le contexte normatif français prévoit différents dispositifs en fonction de ces catégories. Les produits dits traditionnels et dont l'aptitude à l'usage est bien connue sont souvent couverts par un Document technique unifié (DTU). Ce dernier décrira notamment les règles techniques relatives à l'exécution des travaux et peut avoir une valeur contractuelle.

Pour les systèmes plus récents il existe différents dispositifs. Leurs rôles sont multiples, mais de manière générale ils visent à certifier que les systèmes sont en adéquation avec les législations en vigueur, aptes à la mise en œuvre et que leurs performances se maintiennent pendant un temps raisonnable. Cette certification sert de sésame à l'accès au marché pour ces produits puisqu'elle permet aux différents acteurs – notamment les assureurs - d'accorder un niveau de confiance suffisant au système en question.

Sans avoir l'ambition d'une description exhaustive de ces dispositifs, nous pouvons distinguer l'Avis technique (ATec), la procédure standardisée, ainsi que deux procédures « amont » : l'Appréciation technique d'expérimentation (ATex) ainsi qu'une procédure « à dire d'expert », le Pass innovation. Cette dernière est une procédure rapide : elle n'implique pas la réalisation d'essais et nécessite uniquement un jugement d'expert de la part des évaluateurs. Ils seront amenés à se prononcer, sur la base d'un dossier monté par le fabricant, sur divers points critiques : stabilité structurelle, sécurité incendie, réglementation thermique, maintien des performances dans le temps, etc.

C'est cette problématique de l'évaluation à dire d'expert appliquée à la notion de « maintien des performances dans le temps » - nous parlerons plus loin de *durabilité* - qui constitue le contexte général de nos travaux de thèse.

En effet, une estimation à dire d'expert implique nécessairement des connaissances relatives au comportement dans le temps des produits. Ces connaissances peuvent être de plusieurs ordres : nature des mécanismes de dégradation, vieillissement global du produit dans un environnement donné, etc. Nous pouvons envisager que ces connaissances sont à disposition des évaluateurs pour les systèmes existants et qu'ils peuvent par analogie déduire les propriétés des

produits proches de ceux présents sur le marché. Or la typologie des produits s'enrichit constamment de nouveautés dont les caractéristiques (fonction, matériaux constitutifs ...) sont trop éloignées des produits existants pour que ce type de raisonnement puisse s'appliquer. Nous pouvons notamment évoquer ici les préoccupations du développement durable qui sont un des moteurs de cette innovation : nouveaux systèmes énergétiques, matériaux bio-sourcés, complexes d'isolation renforcés, mais également les « systèmes intelligents » : vitrages électrochromiques, domotique, etc.

L'évaluation « à dire d'expert » se complexifie alors par la nécessité de prendre en compte l'innovation. Des outils et méthodes permettant de prédire l'évolution des performances d'un système dans le temps ont bien été développés spécifiquement pour le domaine du bâtiment ; mais nous constatons qu'ils ne sont généralement pas applicables aux produits dont les caractéristiques diffèrent trop de ceux déjà en service. Nous pouvons ainsi évoquer la méthode des facteurs, ou les modèles à bases de chaînes de Markov.

Cette problématique pousse au développement de nouvelles solutions, à destination des évaluateurs. Jérôme Lair (Lair, 2000a) propose d'utiliser une approche basée sur l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), initialement utilisée dans l'aéronautique, comme moyen de structurer les informations relatives à la durée de vie d'un produit. Elle présente en particulier l'avantage d'être basée uniquement sur une description structurelle et fonctionnelle du produit. Cela la rend utilisable dans le cadre de produits pour lesquels il n'y a pas de retour d'expérience. Cependant cette approche ne permet pas de parvenir directement à une estimation de la durée de vie d'un produit. En revanche, son utilisation comme aide à l'évaluation de la durabilité a été démontrée (Hans, 2007a), (Talon, 2005).

Néanmoins les limites de cette méthode ont été identifiées (Hans, 2007b) et correspondent également à celles qui sont généralement décrites dans la littérature : la méthode reste fastidieuse et les résultats ne sont pas réutilisables d'une étude à l'autre. Le développement d'outil logiciel d'aide à la conduite d'AMDE destiné au domaine du bâtiment a été envisagé pour pallier ces limitations et notre travail vise à répondre à cette problématique.

Objectifs des travaux

L'objectif du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) est de fournir aux évaluateurs, ainsi qu'aux autres agents, un outil permettant d'identifier les modes de défaillances potentiels d'un produit de construction à partir d'une description simplifiée de ce dernier ainsi que de son environnement. Cet objectif général a été affiné en plusieurs sous objectifs qui sont autant de caractéristiques que l'outil devra posséder. Nous présentons ci-dessous la liste de ces sous-objectifs que nous détaillons ci-après :

- Faciliter la conduite d'une étude, notamment en permettant à un agent de réaliser l'étude en autonomie ;
- Diminuer le temps nécessaire à l'obtention des résultats, notamment en automatisant certaines étapes ;
- Permettre le partage des connaissances relatives au produit et à leurs modes de défaillances ;
- Être applicable à l'ensemble des familles de produits du bâtiment.

Permettre et faciliter la conduite d'une étude : Recouvre aussi bien les aspects fonctionnels qu'ergonomiques. L'idée centrale est ici de permettre la conduite d'une étude sans le concours d'un expert méthode. Autrement dit l'expert « produit » doit pouvoir être guidé le long de l'étude par l'outil.

Diminuer le temps nécessaire à l'obtention des résultats : De précédents travaux réalisés en suivant un protocole d'AMDE « traditionnel » ont permis d'évaluer la conduite d'une étude complète à plusieurs jours de travail (Hans, 2007b). La réduction du temps nécessaire à l'obtention des résultats implique plusieurs aspects. L'automatisation de l'étude est un d'entre eux. Par automatisation nous entendons plusieurs choses : d'une part l'identification des modes de défaillances par l'outil à partir de la description du produit et de connaissances annexes, d'autre part la déduction des effets de ces modes de défaillances sur le produit étudié.

Réutiliser les connaissances d'une étude à une autre et d'un utilisateur à un autre. Cet aspect implique de permettre à un utilisateur d'avoir accès aux données

renseignées par les autres utilisateurs : types de produits et leurs composants, modes de défaillances et leurs causes, types d'environnements, etc.

Être applicable à l'ensemble des produits du bâtiment : Finalement il y a une forte demande de « généralité » : l'outil doit pouvoir prendre en compte l'ensemble des systèmes constructifs passés et à venir dans l'ensemble des environnements en œuvre.

Un premier outil visant à répondre à ces attentes a été développé, mais il ne remplit pas l'ensemble de ces objectifs. Nous l'aborderons en plus en détail au chapitre B. Ces divers objectifs ont été définis ci-après avec plus de précision :

Vis-à-vis de ces différents objectifs nous pouvons émettre deux remarques. D'une part ils ne sont pas véritablement indépendants les uns des autres : l'étude d'un produit pourra, par exemple, paraître plus facile si elle est plus rapide ou si l'utilisateur peut réutiliser des informations provenant d'études précédentes. D'autre part lors du développement d'un outil, il n'est pas possible de les traiter simultanément. Il nous faut donc les hiérarchiser. Nous choisissons ainsi d'orienter notre travail en développant plus spécifiquement l'aspect automatisation qui nous semble le plus intéressant en termes de bénéfices attendus pour l'utilisateur.

Pour cela nous développons un cadre de modélisation qui permettra une représentation simplifiée des produits de construction. Ce cadre de modélisation vise à servir de base au développement d'un outil d'aide à l'analyse des risques. Un premier prototype d'un tel outil a été développé en sous-traitance selon nos spécifications.

Nous aborderons dans un premier temps en partie B.1 les deux principales méthodes de prévision de la durée de vie des produits de construction : la méthode des facteurs ainsi que les modèles markoviens. Nous décrirons ensuite différents travaux relatifs à l'application de la méthode AMDE au domaine du bâtiment.

La partie B.2 sera consacrée à un état de l'art des outils et modèles liés à l'automatisation de l'analyse des risques, y compris l'outil développé par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB). Cet état de l'art nous permettra d'identifier les bases du cadre de modélisation. Ce dernier sera développé plus en

détail au chapitre C. Nous décrirons également dans cette partie le prototype d'outil développé.

Nous aborderons ensuite l'évaluation du cadre de modélisation, notamment au travers des premiers résultats obtenus par l'outil. Pour cela nous comparerons les résultats de l'étude AMDE d'un produit connu obtenus par une approche « classique » et réalisée par un groupe d'experts aux résultats obtenus par l'outil. Des études complémentaires visant à tester de manière plus poussée certaines fonctionnalités seront également réalisées.

Partie A .

État de l'art

A.1. Pérennité des performances : État de l'art des recherches, méthodes et outils existants

A.1.1. Généralités

Le terme « durabilité » possède aujourd'hui deux sens. Le premier implique la notion de pérennité des performances. Le second s'est construit suite à la traduction du terme anglais « sustainability » par « développement durable » : on parle de produit ou bâtiment durable s'il respecte les principes du développement durable. Les deux notions sont liées, mais nous nous intéressons plus spécifiquement à la première, qui repose sur trois piliers [ISO, 2000] :

- la notion de fonction, qui permet de définir de façon qualitative les attentes des acteurs vis-à-vis du système ;
- la notion de performance, qui permet de définir des critères objectifs et mesurables pour quantifier le respect ou non des fonctions et finalement ;
- la notion de condition d'usage qui permet de délimiter le cadre dans lequel l'évaluation reste valide.

Il existe plusieurs échelles granulométriques à partir desquelles la problématique de la durabilité est abordée. On distingue généralement les approches à l'échelle des produits et celles à l'échelle des matériaux. Talon (2006) considère par exemple quatre niveaux : matériau, composant, produit de construction et ouvrage. Dans la suite de ce mémoire, nous emploierons le terme *système* pour désigner une partie d'ouvrage et le terme *composant* pour désigner une partie d'un *système*.

Il existe de nombreuses méthodes applicables et appliquées à l'évaluation de la durabilité. Ces méthodes peuvent être classées de différentes façons. Ainsi, Hodve et Moser (Hodve, 2004) distingue deux principaux types : les méthodes déterministes et les méthodes probabilistes. La distinction réside dans le fait que les approches probabilistes, ou stochastiques prennent en compte l'aspect aléatoire des variables utilisées.

Il nous semble également utile d'évoquer la distinction entre les approches empiriques et les approches analytiques (*ibid.*). Les premières sont basées sur des retours d'expériences (études de terrain) et des résultats de tests effectués en

laboratoires, les secondes sont construites autour de connaissances fondamentales des mécanismes entrant en jeu dans l'évolution des performances dans le temps.

À côté de ces méthodes destinées à prévoir l'évolution des performances dans le temps il en existe un certain nombre d'autres, issues de domaines connexes, qui permettent d'obtenir des informations complémentaires. Les approches basées sur les analyses des risques, et en particulier l'AMDEC, en font partie. Mis à part dans le cas de l'approche proposée par Talon (2006), l'AMDEC ne permet pas d'obtenir une évaluation de la durabilité d'un système, la notion de temps n'étant pas prise en compte de manière explicite. En revanche, elle permet d'identifier, et cela dès la phase de conception, les points critiques d'un système par identification de ces modes de défaillances potentiels. Dans la suite, nous aborderons une approche probabiliste, une déterministe, ainsi que l'AMDEC.

A.1.2. Outils et méthodes pour le bâtiment

A.1.2.1. Méthode des facteurs et norme ISO 15686

La méthode des facteurs est actuellement considérée comme la méthode de référence pour l'estimation de la durée de vie en service d'un ouvrage donné. Elle est basée sur la prise en compte de l'influence sur une durée de vie de référence (DVR) d'un certain nombre de facteurs, qui sont à déterminer au cas par cas, et donne une durée de vie estimée (DVE). On la retrouve généralement exprimée sous la forme de l'équation suivante :

$$DVE = DVR \times f_A \times f_B \times f_V \times f_D \times f_E \times f_F \times f_G$$

Les différents facteurs à prendre en compte sont décrits dans le tableau suivant :

Facteurs		Conditions à prendre en compte et exemple	
Agents correspondant aux caractéristiques de qualité inhérentes	A	Qualité des composants	Fabrication, stockage, transport, matériaux ...
	B	Niveau de conception	Incorporation, protection par le reste de la structure.
	C	Niveau de réalisation	Gestion du chantier, niveau d'exécution, conditions climatiques.
Environnement	D	Environnement intérieur	Agressivité de l'environnement, ventilation, condensation.
	E	Environnement extérieur	Hauteur du bâtiment, conditions micro-environnementales
Conditions de fonctionnement	F	Conditions d'utilisation	Choc mécaniques, catégorie d'utilisateur, détérioration naturelle
	G	Niveau d'entretien	Qualité et fréquence d'entretien, accessibilité pour l'entretien.

Figure A-1. Liste des facteurs

Cette approche fait l'objet d'une norme (norme ISO 15686 – 1 à 10), qui aborde également différents aspects connexes à la méthode : qualité et évaluation des données, utilisation des résultats dans le cadre d'approches en coût global, ainsi que des exemples de facteurs à prendre en compte pour certains systèmes constructifs. La méthode des facteurs a donné lieu à de nombreux travaux académiques et mises en application (Hodve, 2004), par exemple au sein de la plateforme de suivi de performances EVAPerfs (CSTB, 2009).

D'après Hodve et Moser (*Ibid.*), les principales limitations de cette approche sont les suivantes :

- La multiplication des facteurs sans pondération entre eux ;
- L'obtention d'un résultat unique qui ne reflète pas nécessairement la réalité ;
- L'effort important nécessaire à la collecte des données ;
- Et finalement, l'absence de relation entre les facteurs considérés et des paramètres mesurables (températures, humidité, etc.).

A.1.2.2. Modèles markoviens

De nombreux travaux concernant les chaînes de Markov appliqués aux modèles de vieillissement du bâtiment sont présentés comme une bonne alternative à la méthode des facteurs (Mc Duling, 2008).

L'utilisation de modèles stochastique, et en particulier les modèles markoviens, pour la prévision de durée de vie des ouvrages ou partie d'ouvrage est possible ; sous réserve de considérer que les dégradations soient vues comme des processus markoviens. En particulier, de nombreux logiciels de gestion d'infrastructure se basent sur des chaînes de Markov (Morcou, 2004).

Les processus markoviens permettent entre autres d'étudier l'évolution des systèmes dans le temps. L'approche consiste à déterminer l'ensemble des états possible du système (c'est l'espace des états) qui, d'un point de vue mathématique, est un ensemble de variables aléatoires. On parle de chaîne de Markov dans le cas ou ces variables sont discrètes

L'étape suivante consiste à déterminer un pas de temps. Il servira de période de référence pour l'ensemble des probabilités de transitions entre les états (taux de transition). Ces dernières sont regroupées au sein d'une matrice de transition. Cette analyse est traditionnellement réalisée à partir de graphes d'états dont les sommets correspondent aux différents états et les arcs aux probabilités de transition (Figure A-2).

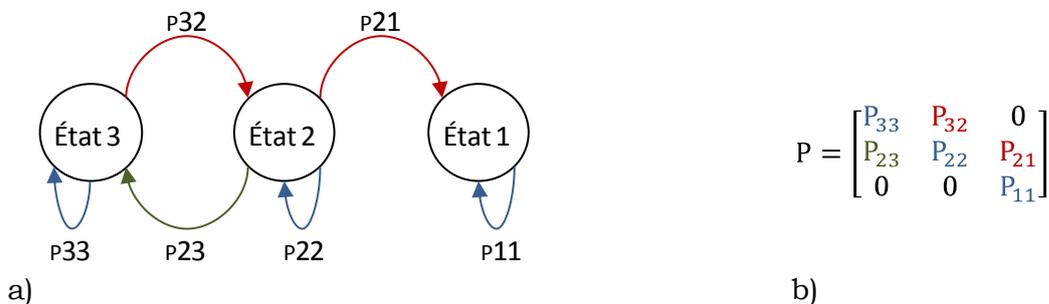


Figure A-2. (a) - Représentation graphique d'un système markovien - (b) Matrice de transition équivalente.

En fonction des hypothèses de départ, une chaîne de Markov permet donc de prédire l'état d'un système à un pas de temps donné.

Les chaînes de Markov ne sont en général pas utilisées uniquement comme outil de prévision de durée de vie. Elles permettent en effet de prendre en compte de nombreux paramètres, entre autres financiers. Elles autorisent également la comparaison de différents scénarii de maintenance, ce qui en fait une solution souvent envisagée pour l'optimisation de politique de gestion d'infrastructure (Morcou, 2004), (Lacasse, 2008).

Pour Lounis et coll. (Lounis, 1998), ces modèles permettent de rendre compte :

- De la temporalité de ces phénomènes, et par là même l'évolution de la performance dans le temps ;
- Du caractère non déterministe de la performance du produit ainsi que des paramètres qui l'affectent : propriétés de matériaux constitutifs du produit, condition d'utilisation, qualité de la mise en œuvre, etc.

Beaucoup d'auteurs s'accordent à dire que le peuplement des matrices de transition, c'est-à-dire l'estimation des probabilités de transition, est un point critique (Hodve et Moser, 2006), (Lacasse, 2008), à cause, entre autres, du nombre important de données d'entrée nécessaire. Ainsi même quand on dispose d'études de terrain, les probabilités de transition ne peuvent être déduites facilement des observations sans une bonne connaissance des phénomènes qui les causent. Mc Duling remarque par ailleurs que peu de travaux abordent le problème de la méthodologie permettant de déterminer ces probabilités (Mc Duling, 2006).

Partant du constat que les probabilités de transition sont le point critique du fait de la difficulté d'obtenir des données de terrain, Mc Duling *et coll.* utilise des réseaux de neurones flous pour intégrer du savoir expert dans les matrices de transition (Mc Duling, 2008) et (Mc Duling, 2006). Leurs cas d'application portent sur un ensemble d'hôpitaux pour lesquels les facteurs de dégradation/durabilité envisagée sont similaires à ceux utilisés dans la méthode des facteurs. Les connaissances des experts deviennent la principale source d'information, mais le modèle est néanmoins calibré à l'aide de données provenant d'une étude pilote.

Morcous et Lounis (Morcous, 2005) utilisent des algorithmes génétiques pour optimiser la politique de maintenance d'un réseau d'infrastructure (des ponts). La prédiction des performances en fonction du temps étant assurée par un modèle markovien. Différents éléments des ouvrages ont été identifiés et sont inspectés régulièrement (il existe 7 éléments différents). Pour chaque type d'élément, il existe un paramètre à prendre en compte (p.ex. % de matériaux restant sur la section, surface du défaut ...), paramètre dont l'amplitude est évaluée à l'aide d'une échelle allant de 1 à 6. L'état général de l'ouvrage est ensuite déterminé en prenant en compte l'évaluation de chacun de ces sept éléments, le poids de chaque évaluation ayant été initialement établi à dire d'expert. Quatre environnements types ont ensuite été définis, et une matrice de transition par environnement est déterminée.

Les différentes options de maintenance et leurs couts associés sont ensuite exprimés dans un formalisme markovien, le tout formant un problème d'optimisation résolu à l'aide d'algorithmes génétiques.

Zhang *et coll.* (Zhang, 2005) s'attache à évaluer la propagation des incertitudes sur la qualité des modèles markoviens décrits, entre autres, dans (Lounis, 1998). La propagation des variations des paramètres d'entrée sur les résultats en termes d'estimation de durée de vie et d'aide à la décision est simulée à l'aide d'une méthode de Monte-Carlo. Ils constatent que de faibles variations des paramètres d'entrées peuvent conduire à des écarts importants sur les résultats finaux. Ils constatent également que l'utilisation de dire d'expert peut être plus efficace que les méthodologies de relevé de niveau de performance.

A.1.3. Applications de l'AMDEC au domaine du bâtiment

A.1.3.1. AMDE et AMDEC, généralités

Développée au début des années soixante sur la base des premiers travaux relatifs à l'analyse des risques (pour l'aéronautique et le nucléaire militaire), l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) a depuis été utilisée dans de nombreux domaines.

Si la méthode ne repose sur aucune base théorique, plusieurs normes y font référence ou lui sont consacrées (p. ex. NF EN 60812, NF X 60-510 et ISO 9000). Elle est aujourd'hui appliquée dans de nombreux domaines de l'ingénierie, en particulier l'automobile où la réalisation d'AMDE peut faire partie des exigences contractuelles entre constructeurs et sous-traitants.

C'est une méthode, une démarche, visant à identifier les défaillances ou dysfonctionnement pouvant affecter un système ou un processus, ainsi que les situations y conduisant et d'éventuelles actions correctives. C'est une méthode fiabiliste, au même titre que de nombreuses autres (analyse préliminaire des risques, analyse par arbres de défaillances, etc.).

L'AMDE est réalisée en plusieurs phases, qui sont résumées ci-dessous dans le cas où elle a pour objet un produit :

- La constitution d'un groupe de travail : concepteurs, représentant qualité, etc. ;
- L'identification des parties du système étudié : la décomposition du système en sous-système et composants ;
- L'analyse fonctionnelle : la détermination des fonctions des parties du système ;
- La mise à jour des modes de défaillances, qui s'appuie sur l'analyse fonctionnelle.

Enfin, l'AMDE peut être complétée par une étude de criticité des modes de défaillances. Dans ce cas, à chaque mode de défaillances est attribué un indice de criticité en fonction de paramètres préétablis. On parlera alors d'AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité). Les paramètres pris en compte sont généralement : la gravité de l'effet, la probabilité d'occurrence et la probabilité de non détection. Pour chaque mode de défaillance ces paramètres sont évalués sur une échelle – allant généralement de 1 à 5 ou de 1 à 10 – puis ensuite multipliés pour constituer l'indice de priorité de risque (IPR). Le classement des modes de défaillances par IPR permet de déterminer lesquels traiter en priorité.

Les résultats sont généralement présentés sous forme de tableau référençant, pour chaque composant du système étudié : les fonctions assurées par le composant, les modes de défaillances des composants, les causes et les effets de ces modes de défaillances ... la liste n'est pas exhaustive. En pratique il est courant de rencontrer des tableaux présentant des colonnes complémentaires destinées à prendre en compte plus d'information : la criticité, les actions correctives envisageables, etc.

D'après la norme ISO 60812 (ISO, 2006), les raisons d'entreprendre une AMDE sont de plusieurs ordres : identifier les défaillances potentielles, améliorer la fiabilité, identifier des opérations de maintenances nécessaires, etc. Par ailleurs, cette méthode peut être utilisée à différentes étapes du cycle de vie d'un produit, même si ses bénéfices sont plus grands quand elle est appliquée pendant la phase de conception.

A.1.3.2. AMDE dans le cadre du bâtiment

L'application de l'AMDE dans le domaine du bâtiment est relativement récente par comparaison avec les domaines évoqués au chapitre précédent. J. Lair, dans le cadre de ses travaux sur la durabilité des systèmes constructifs, développe une méthodologie d'évaluation basée sur deux axes (Lair, 2000a) :

- Le premier, basé sur la notion de fusion d'information, vise à permettre l'évaluation de la durée de vie nominale d'un système en utilisant l'ensemble des données disponibles quelle que soit leur nature (résultats d'essais, retour d'expérience, etc.) ;
- Le second consiste à mettre à jour les raccourcis à cette durée de vie nominale à l'aide d'une AMDEC.

Il explore par ailleurs différentes approches complémentaires, notamment l'utilisation de modèles qualitatifs que nous aborderons plus en détail au chapitre A.2.2.2. Pour Lair (*ibid.*), les scénarii de défaillances mis à jours par l'AMDEC permettent de compléter la durée de vie nominale par un ensemble de scénarii de défaillances prématurées.

Pour cela, il propose de combiner une AMDE produit à une AMDE processus. La première vise à prendre en compte les modes de défaillances pouvant apparaître lors de la vie en œuvre, la seconde permet de mettre à jour ceux apparaissant lors de la phase de mise en œuvre ou lors des différentes phases amont (p. ex. assemblage en usine).

Par ailleurs, il identifie la nécessité de mettre en place des outils d'aide à la conduite d'AMDE. Selon lui, ces outils devraient permettre :

- Une aide opérationnelle ;
- La capitalisation d'expérience par l'utilisation de bases de données.

Il développe également un prototype d'outil d'aide à la conduite d'AMDE sous un tableur¹.

Certaines des notions développées par Lair (*ibid.*) sont reprises par Talon (Talon, 2006). Dans le cadre de ces travaux de thèse, elle propose une méthode d'évaluation de la durabilité basée sur la quantification des scénarii de dégradation. Schématiquement, l'objectif de cette méthode – à la différence des travaux de Lair – est de quantifier directement la durabilité d'un système à partir des informations mises à jour par l'AMDE. Une nouvelle définition de la criticité est notamment mise en place : la criticité d'un scénario (enchaînement de phénomènes de dégradations)

¹ Nous n'aborderons pas les caractéristiques de cet outil car elles ont été pour partie reprises lors du développement du logiciel CPAO que nous décrirons au chapitre A.2.4.

est définie comme une combinaison de trois critères : l'éventualité d'apparition de ce scénario, sa date de réalisation (date à laquelle les effets apparaissent) et sa gravité.

La Figure A-3, extrait de (Talon, 2007), présente de manière simplifiée cette approche : la première étape « analyse des dégradations potentielles du système » est basée sur la réalisation d'une AMDE.

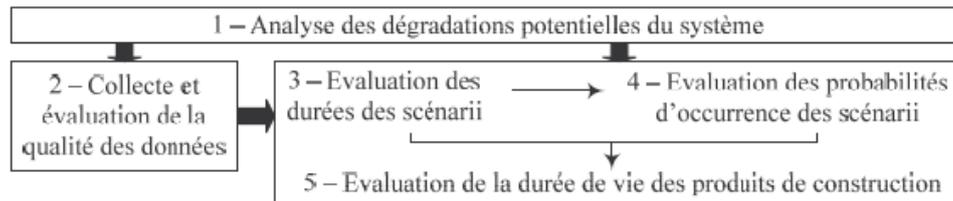


Figure A-3. Principe de l'évaluation de la durée de vie des produits de construction, d'après (Talon, 2007).

À chaque étape décrite par la figure ci-dessus correspondent différents outils ou méthodes, nous n'abordons ici que la première qui est nommée « analyse qualitative » dans (Talon, 2006). D'après l'auteur, l'analyse qualitative comprend quatre phases, que nous reproduisons ici :

- «
- **Analyse structurelle** : modélisation de la structure du produit et de son environnement [...]
 - **Analyse fonctionnelle** : modélisation du comportement fonctionnel du produit au cours du temps par identification des fonctions assurées par ce produit et ses composants puis classification de ces fonctions ;
 - **Analyse du processus** : identification de l'ensemble des phénomènes dus au processus de construction qui sont susceptibles d'influencer le comportement du produit en phase d'exploitation ;
 - **Analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE)** : détermination et caractérisation [...] de l'ensemble des phénomènes susceptibles d'influencer le comportement du produit en phase d'exploitation et leurs enchaînements. »

On retrouve ici la structure générale d'une AMDE telle qu'elle a été définie par Lair (Lair, 2000a), avec notamment une distinction marquée entre la vie en œuvre et les phases amont. Néanmoins, plusieurs précisions sont introduites aux différentes étapes, notamment au niveau de la manière dont les systèmes étudiés (leurs composants, leurs fonctions, etc.) doivent être décrits. Plusieurs de ces

propositions sont incluses dans l'outil CPAO, notamment la structure et le contenu des bases de données.

Par ailleurs, plusieurs autres travaux relatifs à l'application d'AMDE au domaine du bâtiment ont été entrepris au cours des dernières années. Le rapport (Talon, 2007b) en présente un panorama exhaustif auquel le lecteur pourra utilement se référer.

A.2. Analyse des risques assistée par ordinateur

A.2.1. Principes généraux

De nombreuses recherches ont été effectuées en vue de générer automatiquement une analyse des risques à partir de la description d'un produit. Dans la plupart des cas, ces travaux sont destinés à apporter une aide au choix pour les concepteurs, idéalement dès les toutes premières étapes de la conception d'un nouveau produit. L'enjeu est de pouvoir tester différentes hypothèses de conception avant que les détails nécessaires à une simulation numérique (nature exacte des composants, cotes, etc.) ne soient connus.

Différentes approches ont été utilisées au fil des trente dernières années. Elles font généralement appel à une modélisation qui englobe les systèmes étudiés, mais également les phénomènes entrant en jeu dans leur fonctionnement et leurs défaillances. Si certains travaux adoptent une approche qui pourrait être qualifiée d'empirique, la plupart s'apparente au domaine de l'intelligence artificielle et le plus souvent, à celui du raisonnement à base de modèle. Certains de ces travaux sont également intimement liés au domaine du diagnostic de pannes automatisé, ce dernier étant vu comme le corollaire de l'AMDEC (Struss, 2008). Nous nous proposons dans ce chapitre d'identifier leurs dénominateurs communs, sans avoir l'ambition d'une description exhaustive.

Ainsi, pour Bell *et coll.* (Bell, 2007) une automatisation complète — *c.-à-d.* sans intervention de l'utilisateur autre que la description du système — nécessite de pouvoir :

- Simuler le comportement d'un système ;
- Interpréter les résultats de la simulation.

De nombreux auteurs s'accordent également à dire que plusieurs types de représentation des connaissances sont nécessaires pour pouvoir automatiser la génération de rapports d'AMDE. Ces représentations sont autant de modèles du produit étudié et peuvent être utilisées conjointement.

Teoh et Case (Teoh, 2004) en distinguent deux :

- Une représentation structurelle, décrivant la configuration physique du produit en termes de composants constitutifs ;
- Une représentation fonctionnelle, décrivant d'une part les fonctions - pourquoi le système existe, dans quel but a-t-il été conçu - d'autre part le comportement - comment le système assure-t-il ses fonctions.

Bell (Bell, 2006), évoque Chittaro et Kumar qui proposent une approche plus nuancée et distinguent quatre types de représentations de niveau d'abstraction croissant :

- Structurel : Décrit la topologie du système, ses composants constitutifs ;
- Comportemental : Liste les comportements potentiels de chaque composant ;
- Fonctionnel : Décrit le rôle des composants au sein du système ;
- Téléologique : Décrit les finalités du système, ce qu'en attendent ses utilisateurs ou concepteurs.

Il reconnaît néanmoins que si cette vision est partagée, la pratique a montré que ces quatre niveaux sont rarement utilisés simultanément. De plus, le sens précis des représentations fonctionnelles et téléologiques, les plus abstraites, varie d'une étude à l'autre. Il est également courant de trouver des références n'utilisant pas le niveau téléologique.

Ces distinctions peuvent également être rattachées à un principe appelé « *no function in structure* », établi par de Keer et Brown dans le cadre de leurs travaux sur la modélisation qualitative (Erden, 2008). D'après Struss (Struss, 2008), ce principe stipule que la description du comportement d'un sous-système ne doit ne pas être définie par rapport aux fonctions dudit système, sous peine que le modèle du sous-système :

- 1 – Se comporte de façon biaisée lors de la simulation ;

2 – Ne soit pas réutilisable dans un autre contexte, par exemple comme élément d'un autre système.

Struss (*ibid.*) illustre ce principe avec l'exemple du modèle d'une canalisation connectée à une valve antiretour. Le modèle de cette canalisation doit prendre en compte le fait que le courant peut aller dans le sens inverse de celui prévu, pour le cas où la valve serait défaillante.

La question du ou des types de modèles utilisables pour représenter les systèmes constructifs doit donc être abordée. La simulation peut par exemple se faire directement à partir d'un modèle fonctionnel ou à partir d'un modèle de physique qualitative (Bell, 2006). De nombreux auteurs s'accordent à dire que les modèles numériques ne sont en général pas adaptés (Struss, 2008), si bien que de nombreux outils d'AMDE automatisés sont basés sur une forme ou une autre de représentation qualitative du comportement des produits.

Nous nous attacherons donc, dans la suite de ce mémoire, à décrire différentes approches, avec pour objectif de déterminer lesquelles d'entre elles présentent un intérêt pour nos travaux. Dans cette optique, notre attention se portera en premier sur les modes de modélisation.

A.2.2. Modélisation et simulation

A.2.2.1. Différents paradigmes de modélisation des systèmes physiques

Dans le cadre d'outils de raisonnement à base de modèles appliqués au diagnostic automatisé, P. Struss (*ibid.*) note que de nombreux paradigmes de modélisation sont utilisables pour représenter les systèmes physiques : équations algébriques et différentielles, équations différentielles qualitatives, graphes causaux, machines à états finis, réseaux de Pétri, systèmes à événements discrets, graphes de liaisons, etc. ...) pour peu que les aspects de représentation (le modèle du système à étudier) et de raisonnements soient séparés. Pour Struss (*ibid.*), l'automatisation d'AMDEC nécessite la mise en œuvre de modèles qualitatifs, car le but est de déterminer les effets de classes de fautes avec des paramètres non spécifiés. En effet, l'AMDEC est le plus souvent destinée à être mise en œuvre en phase de conception, phase pendant laquelle les détails de la structure du produit ne sont pas encore arrêtés, rendant caduques les approches quantitatives.

Partant du constat, évoqué plus haut que l'analyse des risques automatisée nécessite des modèles qualitatifs, il est possible de distinguer dans la littérature deux principaux types d'approches. Celles-ci se distinguent par le type de connaissance modélisée. La première catégorie, la modélisation et le raisonnement basés sur des modèles de physique qualitative, prend pour objet des connaissances d'ordre structurelle et comportementale. La seconde, que l'on peut qualifier d'approche fonctionnelle, a pour objet des connaissances d'ordre fonctionnel et téléologique. Nous aborderons successivement ces deux types d'approches dans la suite de ce mémoire.

A.2.2.2. Modélisation qualitative

A.2.2.2.1. Les différentes approches

La physique qualitative est souvent décrite comme un formalisme de modélisation non numérique destiné à représenter les connaissances du sens commun relatives à la physique (Forbus, 2008).

Si les sciences dites « dures » (physique, chimie, etc.), ont conduit au développement de nombreuses théories et outils, Bredeweg et Struss (Bredeweg, 2003) relèvent que la *création* du modèle d'un système reste en dehors de ces domaines de recherches. L'un des objectifs de la modélisation qualitative est donc d'occuper ce terrain laissé en friche.

Différents points de vue ont émergé, donnant lieu à autant d'approches. On en distingue principalement trois (Bredeweg, 2006) :

- L'approche orientée composant ;
- L'approche orientée processus ;
- L'approche orientée contrainte.

De Kleer et Brown considèrent les systèmes étudiés comme des réseaux de composants interconnectés qui transforment des entrants pour produire des sortants. Pour Kitamura, l'approche composant provient initialement de la théorie des systèmes et a été adoptée dans de nombreux domaines d'ingénierie, incluant l'ingénierie de la conception via l'approche de Palh et Breitz (Kitamura, 2003).

Les approches orientées processus sont quant à elles centrées sur la représentation des phénomènes physiques vus comme des processus interagissant entre eux.

L'approche de Kuipers se distingue des deux précédentes dans le sens où elle est plus proche du formalisme mathématique classique. Dans ce cadre, des équations différentielles qualitatives, dérivées d'équations existantes sont utilisées

Dans tous les cas, un modèle qualitatif utilise une représentation abstraite de données quantitatives. Chaque variable est décrite en utilisant une série ordonnée de points et d'intervalles appelée espace qualitatif. Les points et intervalles sont généralement choisis pour décrire uniquement les aspects pouvant impacter le comportement des systèmes étudiés. Cet aspect est illustré par la Figure A-4 présentée ci-dessous. Elle décrit les valeurs qualitatives que peut prendre la température d'une substance à l'aide de quatre points et de trois intervalles.

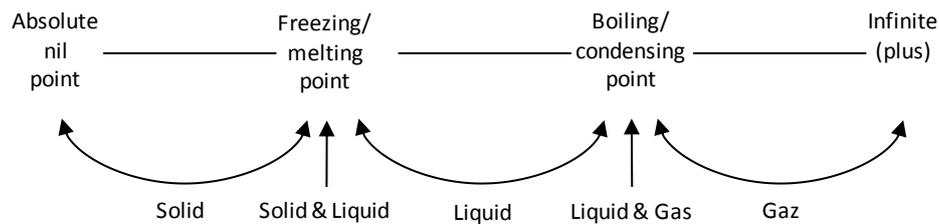


Figure A-4. Espace qualitatif décrivant la température d'une substance d'après (Bredeweg, 2006)

Les modifications du comportement d'un système sont alors représentées en utilisant des dérivées qualitatives des variables préalablement définies : ces dérivées pouvant prendre uniquement trois valeurs : décroissant (p.ex. la température diminue), stable (la température est constante) et croissant (la température augmente).

Ainsi, dans la démarche de de Kleer et Brown, on détermine l'ensemble des combinaisons possibles des comportements des composants (*intrastate analysis*), on détermine ensuite le comportement global qui prévaudra après un certain temps (*interstate analysis*). Cela revient à identifier la manière dont les variables qualitatives vont évoluer de façon à faire changer le comportement du composant. En reprenant l'exemple de la figure C-3, cela revient à déduire que si l'on chauffe une substance dans l'état liquide, elle passera successivement par un état intermédiaire (mélange de liquide et de gaz au point d'ébullition) puis à l'état

gazeux ; ce dernier prévaudra après un temps indéterminé. Nous évoquerons un exemple plus complet au chapitre suivant. Mis à part l'approche de Kuipers, ces formalismes de modélisation qualitative possèdent plusieurs points communs, identifiés par Bredeweg et Struss (Bredeweg, 2003) et dont nous reproduisons ici une liste non exhaustive :

- La volonté de développer une représentation explicite des modèles ;
- Une prise en compte explicite de la causalité ;
- Une approche de modélisation dite compositionnelle (*compositional modeling*).

Pour ce dernier aspect, les auteurs précisent que la plupart des approches de modélisation qualitative adoptent un point de vue réductionniste. Elles visent à constituer des bibliothèques de fragments de modèles élémentaires et indépendants (décrivant par exemple le comportement des composants, des ensembles de processus, etc.). Cette approche fournit la base pour automatiser la construction et la réutilisation des modèles, en les « composant » à partir de « fragments » existants (*ibid.*).

A.2.2.2.2. Exemple d'approche qualitative : modèle de dégradation du béton

Dans le cadre de ses travaux de thèse, J. Lair (Lair, 2000a) explore l'utilisation d'un modèle qualitatif de dégradation d'éléments en béton armé comme outil de prévision de la durabilité. Les résultats générés par son modèle sont ensuite confrontés à ceux d'une étude statistique provenant de la littérature. Dans un premier temps, les variables caractérisant les phénomènes en jeu sont identifiées : concentrations en agents environnementaux, variables caractérisant l'état du système (degré de carbonations, degré de corrosion des aciers ...). Chaque variable est décrite sur un espace qualitatif à six niveaux :

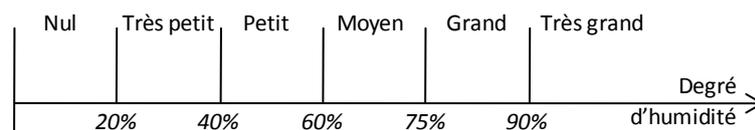


Figure A-5. Espace qualitatif décrivant la variable « Degré d'humidité ».

Les influences et relations entre variables sont ensuite déterminées à dire d'experts. Cela permet de constituer un graphe causal dont les nœuds représentent

les variables et les arcs les influences entre ces variables. Trois types d'influences sont utilisés :

- $A \xrightarrow{X} B$: influence positive, l'augmentation de A conduit à une augmentation de B ;
- $A \xrightarrow{/} B$: influence négative, l'augmentation de A conduit à une diminution de B ;
- $A \xrightarrow{f(X)} B$: influence complexe déterminée à l'aide d'une table *ad hoc*.

Le graphe causal complet résultant de cette démarche et développé par J. Lair (Lair, 2000b) est présenté Figure A-6.

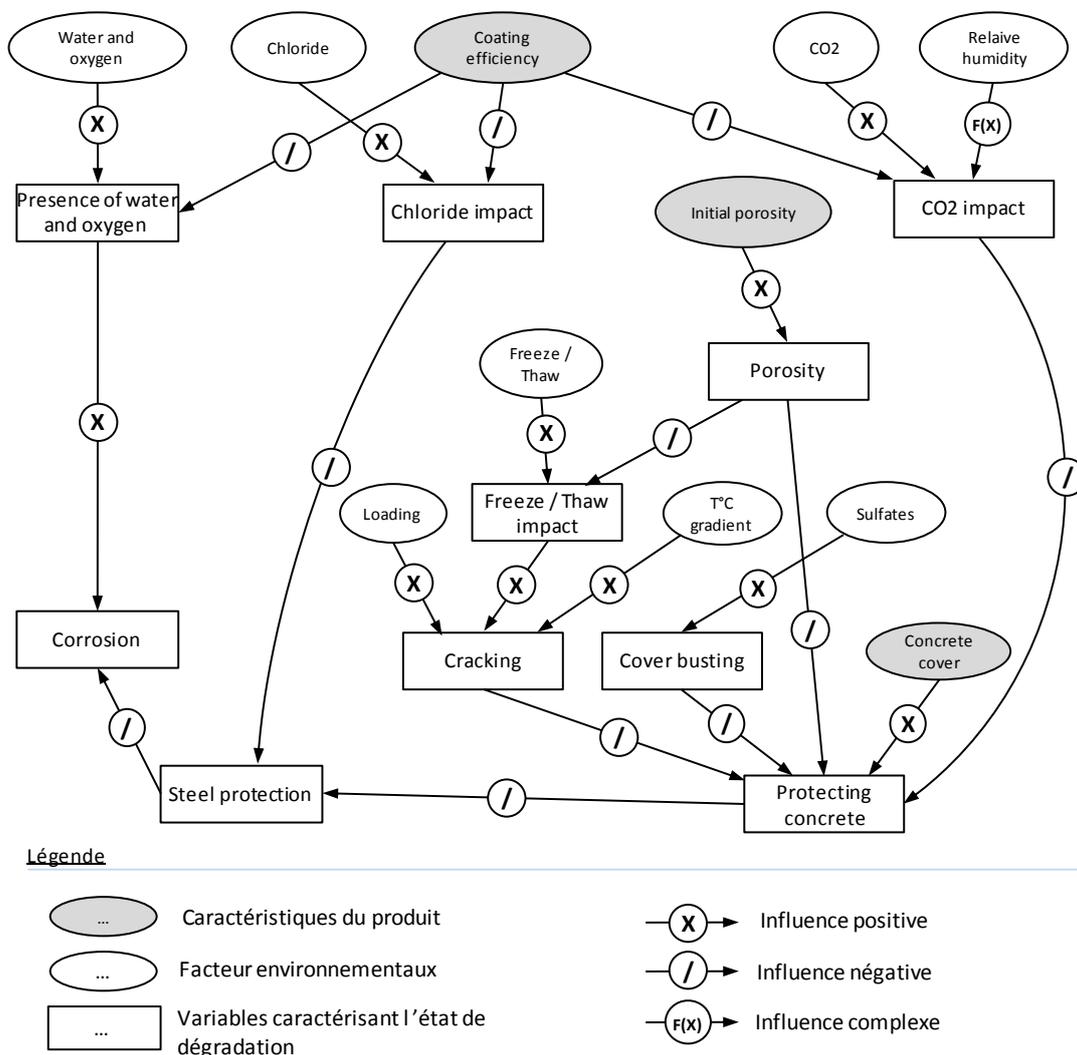


Figure A-6. Graphe causal décrivant les influences entre variables - modèle qualitatif de dégradation du béton. D'après (Lair 2000b).

Une partie des paramètres étant fixée, l'influence de deux variables, la quantité d'enrobage et la présence ou non de protection (peinture), sur la variable corrosion est étudiée par propagation des relations au sein du graphe. Le classement des

différentes valeurs de corrosions, obtenu par propagation des influences le long du graphe, est ensuite comparé à une étude statistique. Le Tableau 1 ci-après présente les résultats de cette comparaison.

	Graphe causal		Modèle probabiliste		
	Valeur (corrosion)	Classement	Valeur (Durée de vie moyenne et écart-type)		Classement (sur la moyenne)
Solution 1	Moyen	4 ^{ème}	$\mu = 34$ ans	$\sigma = 28$ ans	4 ^{ème}
Solution 2	Faible	2 ^{ème}	$\mu = 123$ ans	$\sigma = 86$ ans	2 ^{ème}
Solution 3	Faible	2 ^{ème}	$\mu = 103$ ans	$\sigma = 144$ ans	3 ^{ème}
Solution 4	Très faible	1 ^{ère}	$\mu = 417$ ans	$\sigma = 474$ ans	1 ^{ère}

Tableau 1. Confrontation entre les résultats de la simulation qualitative et ceux du modèle probabiliste. D'après (Lair 2000b).

Les résultats permettent de constater que l'approche qualitative permet d'obtenir un classement des différentes solutions techniques comparable à celui obtenu par l'approche statistique. Le modèle qualitatif ne parvient cependant pas à réaliser une discrimination entre les solutions 2 et 3.

Lair conclut à un intérêt de la méthode. Il note que cette approche semble pouvoir répondre en partie à la problématique des produits innovants pour lesquels il serait possible de développer de tels graphes causaux par analogie avec des systèmes existants.

Il est néanmoins indiqué que ce graphe causal, ainsi que les résultats qu'il permet d'obtenir, ne décrivent que le comportement nominal du système considéré. Pour les auteurs, une analyse AMDE serait intéressante en complément dans la mesure où elle permettrait de mettre à jour des phénomènes qui ne sont pas pris en compte par le modèle qualitatif.

A.2.2.3. Approches fonctionnelles

Il existe principalement deux types d'approches fonctionnelles, chacune issue d'une école différente (Kumar, 1995).

La première, l'approche à base d'états², propose de modéliser les fonctions comme des successions d'états par lesquels passe le système étudié. La plupart de ces travaux découlent de ceux de Chandrasekaran et Sembugamoorthy sur le raisonnement fonctionnel, que nous aborderons au chapitre B.2.2.3.2. Ils ont été employés dans des buts de simulations, aide à la conception et AMDEC (c.f. B.2.3.2.).

La seconde approche est basée sur les concepts de flux et d'efforts issus des travaux relatifs aux graphes de liaison (*bond graph*). Une fonction décrit la manière dont un système agit sur un ensemble de flux. Ces derniers sont généralement subdivisés en trois catégories principales : énergie, matière et information. Chaque fonction peut être décomposée en sous-fonction jusqu'au niveau de précision voulue, comme l'illustre la Figure A-7

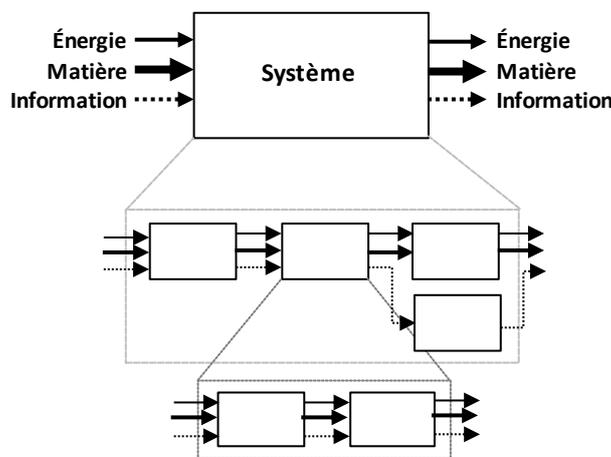


Figure A-7. Représentation d'une décomposition fonctionnelle via une approche à base de flux. Adapté de (Teoh, 2004).

Ce type d'approche se base sur des hiérarchies de fonction et de flux prédéfinies, qui constituent un vocabulaire permettant de décrire les systèmes de manière homogène. Kumar remarque que les travaux visant à développer de telles

² Ce type d'approche est dérivé des méthodes de modélisations des systèmes à états dont les réseaux de Petri et les chaînes de Markov sont les exemples les plus connus.

hiérarchies ont conduit à des résultats similaires. Il suggère que cela est dû à l'aspect « universel » de cette approche comparé à l'approche à base d'états (Kumar, 1995). Plusieurs travaux ont visé à développer des hiérarchies de fonctions et de flux génériques. À partir de ces derniers, des travaux communs ont abouti à la constitution du *Functional Basis* (Stone, 2000) dont la hiérarchie de flux est présentée Figure A-8.

Class (Primary)	Secondary	Tertiary			
Material	Human				
	Gas				
	Liquid				
	Solid	Object Particulate Composite			
	Plasma				
	Mixture	Gas-Gas Liquid-Liquid Solid-Solid Solid-Liquid Liquid-Gas Solid-Gas Solid-Liquid-Gas Colloidal			
	Signal	Status	Auditory Olfactory Tactile Taste Visual		
			Control	Analog Discrete	
			Energy	Human	
				Acoustic	
				Biological	
		Chemical			
	Electrical				
	Electromagnetic	Optical Solar			
Hydraulic					
Magnetic					
Mechanical	Rotational Translational				
Pneumatic					
Radioactive/Nuclear					
Thermal					

Figure A-8. Taxonomie des flux selon (Stone, 2000)

Dans le cadre de leur approche, chacune de ces catégories est ensuite raffinée en sous catégories selon une relation parent-enfant. Il est à noter qu'une approche de type graphe de liaison est utilisée pour représenter les flux de type énergie. Autrement dit à chaque type d'énergie est associée une composante « effort » ainsi qu'une composante « flux » comme indiqué sur l'exemple Figure A-9.

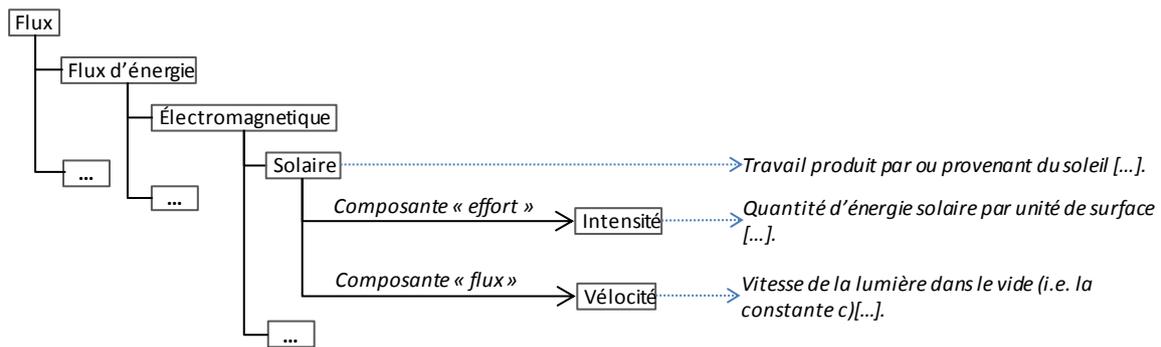


Figure A-9. Extrait du Functional Basis comportant les définitions des flux décrites par les auteurs. D'après (Stone, 2000).

Dans le chapitre suivant nous illustrerons l'utilisation de ce type d'approche dans le cadre d'un outil d'aide au diagnostic. Nous aborderons également le cas d'un outil d'aide à l'analyse des risques au chapitre A.2.3.1.

A.2.2.3.1. Exemple d'approche à base de flux : Multilevel Flow Modeling

L'approche « Multilevel Flow Modeling » (MFM) consiste à modéliser un système en termes de buts et de fonctions élémentaires (van Paassen, 1999).

Ces dernières décrivent les flux de masse et d'énergie qui traversent le système. À la différence des approches évoquées au chapitre précédent, aucun type de flux d'information n'est pris en compte. MFM a été développé pour modéliser des systèmes de production de composés chimiques à grande échelle et pour servir de support à leur diagnostic de panne et leur monitoring. Deux jeux de six fonctions de bases sont définis pour décrire les flux de matière et d'énergie au sein des systèmes (Figure A-10).

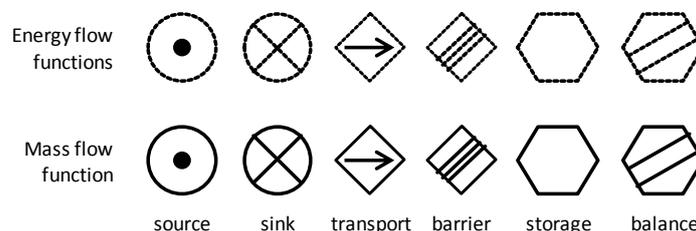


Figure A-10. Typologie des fonctions de base du MFM. Adapté de (van Paassen, 1999).

Ces fonctions sont utilisées pour décrire ce que les auteurs appellent des « masse-flow structure » et « energy-flow structure » qui sont liées aux différents buts du système, préalablement identifiés. La figure B-11 présente une illustration d'une

mass-flow structure, ainsi que le schéma du système qu'elle représente. Il est à noter que les liens entre fonctions ne sont pas des représentations des relations topologiques mais des relations causales.

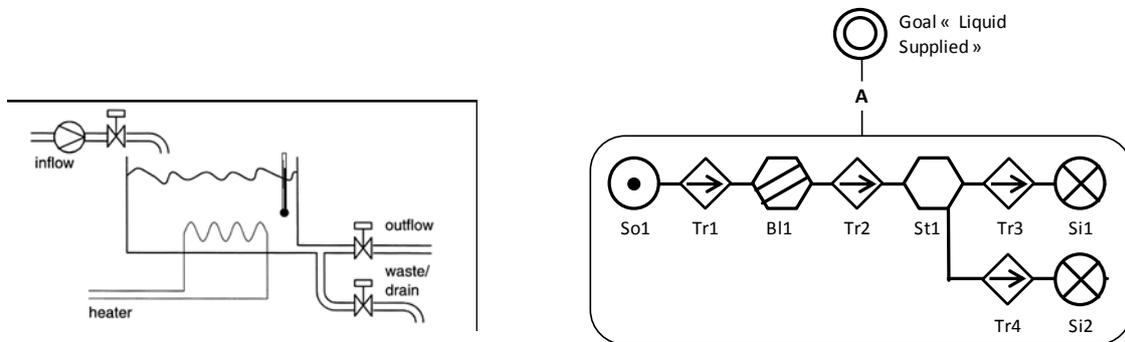


Figure A-11. Schéma d'une « mass-flow structure » ainsi que le schéma du système équivalent. Adapté de (van Paassen, 1999).

Chaque *flow structure* représente une partie du système étudié et est reliée à certains buts du système. Fonctions et buts sont liés à l'aide de deux relations :

- *Achieve*, lie les fonctions au but qu'elles permettent d'atteindre ;
- *Condition* lie les buts qui doivent être atteints avant qu'une fonction ne soit disponible.

Une relation du premier type est représentée sur la figure B-11. Ces deux relations sont à la base du mode de raisonnement utilisé avec MFM (Kumar, 1995). En cas de panne constatée, le processus de diagnostic est initié par l'utilisateur en choisissant un but qui n'est pas atteint. La recherche de la cause de la panne est propagée dans les *structures*, en interrogeant les capteurs (ou l'utilisateur, le cas échéant) pour déterminer l'état des fonctions de chaque *structure* liée directement ou indirectement au but étudié (Chittaro, 1999).

A.2.2.3.2. Exemple d'approche à base d'état : Functional Representation Framework

Josephson et Chandrasekaran (Josephson, 1994) ont défini un cadre de modélisation fonctionnel appelé « Functional Representation³ Framework ». Leurs travaux sont centrés sur la représentation des processus causaux qui sous-tendent les fonctions des systèmes dynamiques.

Ils considèrent que pour remplir sa fonction un système doit passer par une série d'états, chaque transition pouvant être explicitée en faisant appel à différents niveaux de connaissances. Ce mode de représentation est utilisé pour inférer les effets des modes de défaillance par l'outil FLAME présenté au chapitre A.2.3.2.

La représentation d'un système comprend trois parties distinctes :

- Une décomposition du système étudié en plusieurs parties, chacune possédant un jeu de variables destiné à décrire son état. Ces variables peuvent être numériques ou symboliques ;
- Une description des fonctions du système ;
- Une description des comportements qui permettent d'atteindre les fonctions.

Les fonctions sont décrites sous la forme d'un triplet pré-conditions/poste-conditions/comportement :

- Pré-conditions : valeurs particulières des variables d'état pour lesquelles la fonction est applicable ;
- Post-conditions : valeurs particulières des variables d'état après application de la fonction ;
- Comportement : description de la manière dont la fonction est accomplie (sous-fonction ou annotation).

Le comportement peut « pointer » vers une annotation ou vers une autre fonction attribuée à un sous-système comme l'illustre la Figure A-12. Les annotations,

³ Parfois désigné simplement par l'acronyme « FR » dans la littérature.

simples descriptions textuelles, peuvent par exemple être relatives à un domaine de connaissance scientifique (p. ex. une loi physique).

La fonctionnalité est décrite comme un ensemble d'états du système définis par des variables (pré et post-conditions) et reliés par des transitions *via* des comportements (Chandrasekaran, 1994).

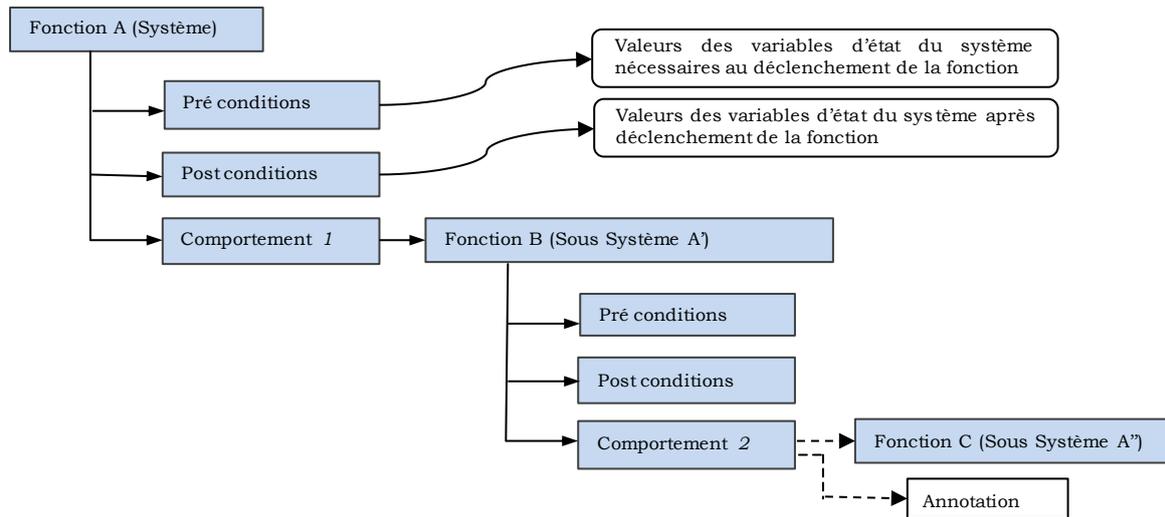


Figure A-12. Structure hiérarchique fonctions/comportement.

Ainsi, la façon dont la première fonction (appelée « fonction A » sur la figure) est remplie par le système est décrite comme un processus causal faisant intervenir les sous-systèmes, leurs fonctions ainsi que leurs comportements qui décrivent la façon dont ces fonctions sont remplies.

Cette représentation est vue par les auteurs comme un graphe orienté dont les nœuds sont des descriptions des états des composants (valeurs des variables d'états) et les arcs indiquent les causes des transitions. Chaque transition pouvant être explicitée à l'aide de connaissances relatives aux composants (leurs comportements) ou au domaine (annotation). Ce mode de représentation a pour caractéristique d'être « flexible » : la description peut se poursuivre en profondeur jusqu'à ce que la fonction atteinte soit considérée comme « vraie » par le modélisateur ou qu'une annotation soit atteinte.

A.2.3. Exemples d'outils et travaux

A.2.3.1. Wifa

Développé par Wirth *et coll.* Wifa⁴ est présenté comme un prototype de système à base de connaissances dont le but affiché est de faciliter et d'encadrer les études AMDE (Wirth, 1996). D'après les auteurs il n'est pas véritablement un outil d'automatisation d'AMDE, mais il vise à offrir un support méthodologique tout en garantissant un certain degré de réutilisation des études.

L'outil s'articule autour de trois bases de connaissances :

- Une base de faits contenant les précédents cas d'études ;
- Une base dite « sémantique » contenant les connaissances techniques (types de systèmes étudiés, types de fonctions, de modes de défaillances, etc.) ;
- Une base de connaissances procédurales relatives à la conduite d'une AMDE.

La seconde est constituée de différentes taxonomies : systèmes, flux, fonctions et processus. Elle permet de structurer la base de cas et de fixer le vocabulaire relatif aux systèmes étudiés.

Les systèmes sont décrits par leurs noms auxquels sont rattachées des listes des fonctions typiquement assurées ainsi que des modes de défaillances possibles. Des informations complémentaires (type de matériau, géométrie, etc.) peuvent également être ajoutées à titre indicatif.

Les fonctions sont décrites à l'aide de verbes, auxquels sont rattachés des flux. Les verbes proviennent d'une liste de 220 items établie par Birkhofer et permettant de décrire de façon exhaustive les fonctions des systèmes physiques. La liste des flux provient quant à elle des travaux de Roth, Pahl & Beitz et suit une organisation similaire aux approches à bases de flux évoquées au chapitre A.2.2.3.

Wifa est l'acronyme d' « AMDE à base de connaissance » en Allemand.

L'étude d'un système ou d'un processus est réalisée en plusieurs étapes, que nous présentons brièvement ici :

- Description de la structure du système ;
- Description d'une structure fonctionnelle (*function structure*);
- Création d'un arbre de défaillance.

La description de la structure du système vise à la constitution d'une hiérarchie des éléments du système selon une relation « partie-tout ». Chacun des éléments peut être décrit par spécialisation des types de systèmes dont il hérite par défaut les caractéristiques (fonction assurée, modes de défaillances, etc.).

La structure fonctionnelle représente les relations fonctionnelles entre les différents éléments du système. Les fonctions attribuées aux éléments du système sont décrites - toujours par spécialisation à partir de la taxonomie de fonction - à l'aide de trois notions :

- Les « *function participant* » qui sont des systèmes (ou des flux) jouant un rôle dans la réalisation de la fonction, les rôles étant source, destination, flux d'entrée et flux de sortie et système « portant la fonction ».
- Les « *Failure participant* », qui sont les systèmes ou flux affectés par un dysfonctionnement de la fonction.
- Les sous-fonctions, qui participent de la fonction réalisée par un sous-système du porteur de la fonction. Un dysfonctionnement d'une sous-fonction entraîne par défaut la non-réalisation de la fonction.

La structure fonctionnelle peut être générée automatiquement à partir de la description des fonctions. Les fonctions étant également reliées entre elles *via* les flux, WIFA propose également de tester la cohérence du modèle du système par propagation des flux, autrement dit en vérifiant qu'à chaque flux « sortant » d'une fonction correspond bien un flux « entrant » dans une autre.

WIFA propose également une fonctionnalité de génération automatique des arbres de défaillances en se basant sur les relations entre fonctions et sous fonctions décrites pendant les étapes précédentes. Au dire des auteurs, cette fonctionnalité reste très limitée, principalement à cause d'une description trop floue des relations entre fonctions.

A.2.3.2. FLAME & AutoSteve

FLAME⁵, ainsi que son dérivé commercial AutoSteve, est un outil d'AMDEC automatisé destiné à l'étude des circuits électriques pour le domaine de l'automobile. Pour ce domaine particulier, FLAME est le premier système à avoir fourni une analyse complètement automatisée (Price, 1998) et AutoSteve, après son intégration dans un outil de CAO, est utilisé par plusieurs constructeurs automobiles (Struss, 2003).

Les différentes versions de ces deux logiciels s'appuient sur le raisonnement à base de modèle pour déterminer les effets des modes de défaillances. Leur particularité est de faire intervenir, en fonction des cas rencontrés, des modèles de simulation présentant différents niveaux d'abstraction. Le passage d'un modèle à l'autre se fait automatiquement grâce à un système de relations qui permet le transfert des modèles d'un module à l'autre du logiciel. Dans tous les cas, ces outils disposent d'une librairie de composants réutilisables auxquels sont rattachées des listes de modes de défaillances.

Dans les premières versions, les effets des modes de défaillances étaient par défaut interprétés à un niveau fonctionnel d'après les travaux de Chandrasekaran et Sticklen (décrit au chapitre A.2.2.3.2). En cas d'ambiguïté dans l'interprétation des effets, le modèle fonctionnel était traduit en un modèle qualitatif équivalent. Ce dernier permettait alors la réalisation d'une simulation plus détaillée des effets de la défaillance. Une fois ceux-ci déterminés, les résultats devaient être retraduits en termes fonctionnels.

Les mises en application ont cependant montré que les utilisateurs rencontraient des difficultés à manipuler les différents niveaux d'abstractions propres aux descriptions fonctionnelles du FM. (Price 1997).

Les versions suivantes de ces logiciels utilisent une approche dite de marquage fonctionnel (Price, 1997). Un marqueur est une description textuelle décrivant le comportement attendu du système (p. ex. « fournir de la lumière » dans le cas d'une

⁵ FLAME : Functional Level Analysis of Failure Modes and Effects.

ampoule électrique). À charge de l'ingénieur de lier le label à l'un des états d'un composant du circuit.

Cette modification implique qu'il n'y a plus de simulateur fonctionnel : l'essentiel de la simulation se fait ensuite au niveau qualitatif, les descriptions fonctionnelles servant uniquement à interpréter les résultats de la simulation.

Les versions successives de FLAME et AutoSteve ont utilisé différents simulateurs. Dans la première version, la structure des systèmes étudiés était représentée comme un réseau de composants muni de ports. Le fonctionnement interne des composants était ensuite défini par un jeu de règles permettant de définir de manière qualitative le passage du courant entre les ports des composants. Par exemple, la résistance électrique peut être représentée par trois valeurs qualitatives $[0 ; l ; \infty]$:

0 : pas de résistance ;

1 : résistance significative ;

∞ : résistance infinie.

L'ensemble des composants interconnectés est vu comme un graphe orienté : chaque composant est vu comme un nœud du circuit et chaque connexion entre composants comme un arc. Un algorithme de parcours de graphe, basé sur les lois de comportements simples (les lois d'Ohm et de Kirchhoff en l'occurrence) permet ensuite de déterminer les points où le circuit est ouvert ainsi que les courts-circuits.

Disposer de modèles défaillants pour chaque composant permet ainsi de tester les effets des modes de défaillances à l'échelle du circuit.

Pour Bell (Bell, 2006), cette approche est effectivement une forme de physique qualitative, mais spécifiée par l'utilisateur au lieu d'être dérivée de lois physiques plus générale, ce qui rend le système plus simple à appréhender.

Une classification de la criticité des modes de défaillance est également proposée. Un indice de criticité est associé directement aux modes de défaillances. D'après les auteurs, le calcul prend aussi en compte l'effet de la défaillance sur les labels fonctionnels.

A.2.4. L'outil CPAO

CPAO (Conception pérenne assistée par ordinateur) est un prototype logiciel d'aide à l'analyse des risques dédié aux composants d'ouvrage du bâtiment développé par le CSTB. Il s'utilise au travers d'un navigateur internet et il fournit également un cadre pour la capitalisation des informations nécessaires aux études. Des bases de données sont ainsi destinées à stocker les différentes informations auxquelles les utilisateurs et le logiciel font appel tout au long de la démarche.

Il possède quelques points communs avec WIFA (décrit au chapitre A.2.3.1), notamment :

- Une organisation taxonomique des informations nécessaires à la description des systèmes ;
- Une liste de fonctions similaires ;
- Un mécanisme de propagation des flux (appelés *agents environnementaux* dans le cas de CPAO).

L'étude réalisée à l'aide du logiciel se déroule en plusieurs étapes, les deux premières étant calquées sur une AMDEC « classique », les suivantes étant prises en charge par l'outil de manière automatisée :

- Analyse structurelle ;
- Analyse fonctionnelle ;
- Migration ;
- Recherche des dégradations.

Lors de l'analyse structurelle, l'utilisateur décrit les *composants* constitutifs du système étudié en leur attribuant un *type*, un *matériau constitutif* et éventuellement un *type de géométrie*.

Les contraintes environnementales sont décrites sous forme de *milieux* (p. ex. milieu intérieur et milieu extérieur à l'ouvrage) contenant des agents environnementaux. La liste de ces derniers est une version plus détaillée de la norme ISO 6241.

Composants et milieux sont ensuite mis en relation via des *contacts*. Ces derniers représentent l'existence d'un contact physique entre éléments.

L'**analyse fonctionnelle** consiste à attribuer des fonctions aux différents éléments du système. Cette opération est réalisée en plusieurs phases :

- Détermination des fonctions principales (FP) du système ;
- Attribution des fonctions principales aux composants qui les assurent ;
- Pour chaque couple fonction principale/composant, identification des fonctions secondaires (FS), attribuées aux composants, qui doivent être assurées pour que la fonction principale le soit.

Le résultat de cette étape est donc, pour chaque FP identifiée, une série de couples FS/composant.

Les fonctions, principales et secondaires, sont généralement décrites sous la forme « verbe » + « agent environnemental » et permettent de décrire l'action d'un composant sur l'agent en question. Les principales fonctions sont : *stopper*, *absorber*, *transporter*, *transformer*, *résister mécaniquement*, *résister structurellement* et *être conforme aux normes*.

Par exemple, un composant ayant pour fonction principale « *être conforme aux normes - économie d'énergie* » pourrait par exemple se voir attribuer la fonction secondaire « *stopper* (une fonction) les *températures basses* (un agent environnemental)».

À la suite de cette étape, le système étudié possède une description de sa structure comportant une liste des contraintes environnementales auxquelles il est soumis, ainsi qu'une description fonctionnelle.

L'étape de migration se base sur une partie de cette dernière pour réaliser une simulation du comportement du système face aux agents environnementaux. En pratique, seules les fonctions *stopper* sont actuellement prises en compte par l'outil. Un composant possédant une fonction *stopper* empêchera les agents environnementaux qui sont en contact avec lui de progresser vers les composants avec lesquels il est en contact.

Après l'étape de migration, la recherche des dégradations permet d'identifier les composants susceptibles d'être défailants. Les dégradations sont décrites sous forme de *causes*, de *cibles* et d'*effets* :

Les causes peuvent être :

- Une incompatibilité avec le matériau constitutif d'un composant voisin ;
- Un contact direct avec un agent environnemental ;
- Une dégradation préexistante ;
- Une erreur de processus (problème de conception, mise en œuvre, etc.).

Les conditions causes de type *dégradations préexistantes* et *erreur de processus* ont uniquement un rôle descriptif et ne rajoutent pas de conditions.

Les *cibles* décrites sont les matériaux constitutifs des composants et leurs types. Pour chaque composant du système, l'algorithme détermine l'adéquation entre d'une part, la description des composants et de leurs « entourages » immédiats (agents environnementaux et matériaux des composants voisins), et d'autre part la description des dégradations présentes dans la base de données.

Les relations de parenté entre données de base sont mises à profit lors de cette recherche. Ainsi une dégradation qui cible les types de matériau « *acier* » ciblera également ses sous-types comme « *acier galvanisé* ».

Les *effets* des dégradations sont exprimés en termes de pertes de fonction ou, le cas échéant, sous forme de descriptions textuelles.

Après cette étape les résultats sont présentés à l'utilisateur avec, pour chaque composant du système :

- Une liste des agents environnementaux en contact avec le composant, sans distinction entre ceux initialement présents et ceux ayant migrés ;
- les modes de dégradations mis à jour.

Il était initialement envisagé de proposer une automatisation complète du processus AMDEC. Le développement de l'outil ayant été interrompu, le détail des algorithmes nécessaires à cette opération n'a pas été décrit. Cependant, le principe général qui avait été retenu est le suivant : les effets des modes de dégradations mis à jour étaient appliqués aux composants touchés en supprimant une partie des fonctions des composants affectés.

Si, parmi ces fonctions, certaines étaient définies comme principales, le produit était alors déclaré comme défaillant pour cette fonction. Une nouvelle étape de migration était ensuite effectuée en prenant en compte les pertes de fonctions. Prenons pour exemple un composant ayant initialement comme fonction *stopper* les *liquides*. S'il vient à perdre cette fonction suite à une dégradation, il transmet alors les agents environnementaux de type *liquides* aux composants voisins. Ces agents transmis peuvent à leur tour causer de nouvelles dégradations.

Ce processus continue de manière itérative jusqu'à ce que toutes les fonctions principales soient touchées ou que les migrations d'une étape à l'autre ne déclenchent plus de nouvelle dégradation. Nous reviendrons plus en détails sur les implications de cette approche au chapitre suivant.

A.3. Analyse critique et étude préliminaire

A.3.1. Limites de l'outil existant CPAO

Jusqu'à présent, nous avons abordé plusieurs points sur lesquels nous allons nous baser pour construire une démarche de recherche. La partie A.1 a abordé la problématique de la durabilité pour le domaine du bâtiment ainsi que les outils et méthodes les plus employés. Les limites de ces derniers vis-à-vis de la problématique des produits innovants (non traditionnels) ont été évoquées. L'utilisation d'analyse des risques, et en particulier l'AMDEC, comme complément de ces méthodes a été évoquée au chapitre A.1.3. Cette partie, reprenant des conclusions de la littérature, se conclue sur la nécessité de développer des outils logiciels d'aide à la conduite d'analyse des risques appliqués au bâtiment.

Les aspects théoriques qui sous-tendent de tels outils sont abordés en A.2.

La partie A.2.1, après une description générale des principes qui sous-tendent l'automatisation d'analyse des risques, conclut à la nécessité de disposer d'un cadre de modélisation qui soit adapté aux produits et systèmes du bâtiment.

Le chapitre A.2.2 décrit et exemplifie deux approches utilisées dans la littérature : l'approche qualitative et l'approche fonctionnelle. Deux outils sont également

décrits en partie A.2.3. Finalement la partie A.2.4 décrit le logiciel CPAO, développé spécifiquement pour le bâtiment.

Ce dernier présente un certain nombre de limitations. Certaines sont dues au fait que toutes les fonctionnalités voulues initialement n'ont pas pu être implémentées, d'autres sont plus fondamentales et leurs causes sont à rechercher auprès de l'approche employée. La présente partie vise à décrire plus finement ces limitations, qui seront analysées par rapport aux éléments mis à jour par l'état de l'art.

A.3.1.1. Descriptions fonctionnelle

Nous avons vu que seules les fonctions de type *stopper* sont actuellement prises en compte sous CPAO. En l'absence de prise en compte des autres fonctions, nous ne pouvons pas parler véritablement de simulation fonctionnelle. Nous nous limiterons donc à des considérations d'ordre général.

L'étape de migration effectuée par CPAO peut être considérée comme une forme de simulation fonctionnelle, comparable pour, certains aspects, aux travaux relatifs à WIFA (cf. A.2.2.3.1). Il y a en effet une similitude entre la façon dont le concept de *flux* est utilisé dans cette approche et l'utilisation du concept *d'agent environnemental* dans CPAO. Il existe néanmoins plusieurs différences quant à la manière dont ces concepts sont utilisés.

Dans le cas de WIFA, les *flux* ont uniquement pour rôle de participer à la description des fonctions des systèmes. La taxonomie de flux utilisée est organisée autour des concepts de matière, énergie et signal tels que décrits au chapitre A.2.2.3. Par ailleurs, une étape de simulation fonctionnelle est effectivement proposée par les auteurs, mais elle est destinée uniquement à vérifier la cohérence des modèles des systèmes.

En revanche, dans le cas de CPAO le rôle des *agents environnementaux* est double : d'une part, participer à la représentation des fonctions des systèmes pendant l'étape de migration ; d'autre part, permettre d'identifier les modes de dégradations des composants.

Par ailleurs, la liste des *agents environnementaux*, reprise de la norme ISO 6241, est construite autour du concept de *dégradation*. Les items de l'arborescence des *agents environnementaux* sont classés vis-à-vis de leur parenté respective en tant

que causes de dégradation. Cela entraîne qu'il est difficile d'obtenir une représentation fonctionnelle d'un composant qui soit à la fois compacte et simulable. Par exemple, il existe un agent environnemental *eau*, sous-type de *liquide* et un agent *pluie*, sous-type de *précipitation*. Pour définir le caractère étanche d'un composant, deux fonctions sont donc nécessaires : « *stopper l'eau* » et « *stopper la pluie* ». Le problème que nous identifions ici est donc lié à la manière dont les différents items sont classés.

A.3.1.1. Pertinence de la simulation fonctionnelle

La phase d'attribution des fonctions aux différentes parties d'un système est également une source potentielle d'erreurs.

Prenons l'exemple d'un réseau d'adduction d'eau, que l'on modéliserait comme un ensemble de composants *canalisations* et de composants *supports* (destinés à maintenir les canalisations). Une représentation intuitive d'un tel système est illustrée Figure A-13. La phase d'attribution de fonction sous CPAO conduirait à affecter une fonction de *transport* de l'agent environnemental *eau*.

Si cela semble adapté d'un point de vue téléologique (une canalisation a effectivement pour rôle de transporter un liquide d'un point A à un point B), il en résulte une représentation ambiguë du point de vue de la simulation, comme l'indique la Figure A-13.

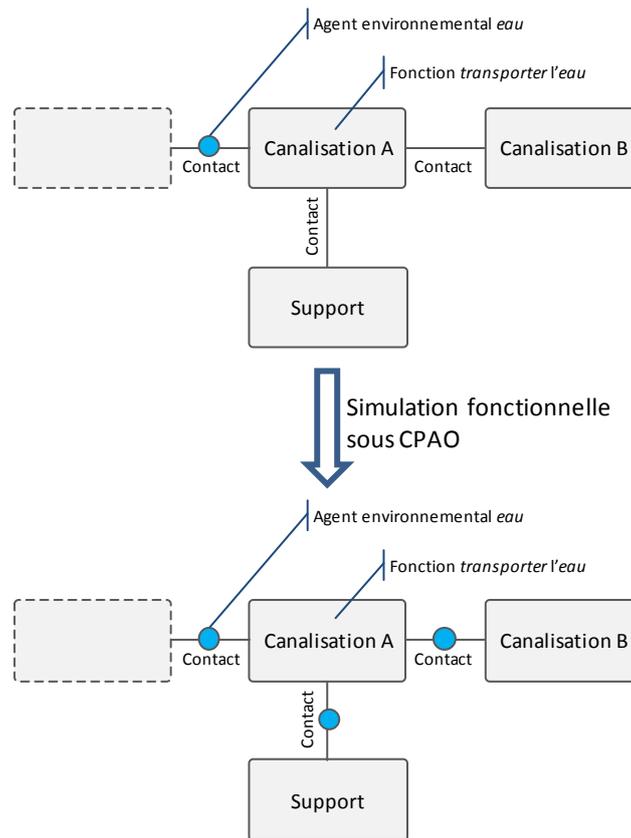


Figure A-13. Représentation du résultat d'une simulation fonctionnelle sous CPAO (étape de migration)

Le modèle décrit Figure A-13 illustre une des limitations de CPAO. Attribuer une fonction de type *transporter* au composant *canalisation* conduirait à une simulation fonctionnelle erronée. En effet le composant *support* se retrouve donc au contact de cet agent environnemental après la phase de migration. Si ce composant n'a pas pour fonction de *stopper* l'agent, ce dernier migrera ensuite vers d'autres composants du système.

En pratique, il n'est pas possible d'indiquer qu'une fonction est « directive ». Cela implique qu'il n'existe qu'un seul niveau de décomposition valide pour la description des systèmes : celui où une description de la fonction permet la migration des agents environnementaux.

La figure Figure A-14 montre une représentation d'un composant canalisation respectant ce principe et permettant d'obtenir une simulation fonctionnelle dont les résultats sont corrects.

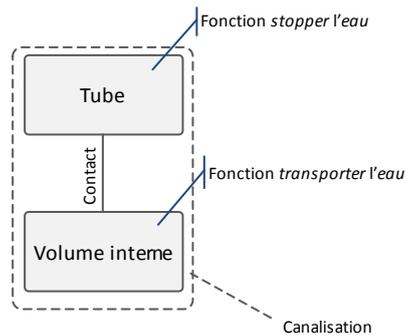


Figure A-14. Représentation d'une canalisation à l'aide de deux composants

Cette représentation présente le défaut de faire appel à deux modèles de composant et d'être moins intuitive.

Nous avons abordé, au chapitre A.2.1, les différents principes généraux nécessaires à la mise en place d'analyse des risques automatisée, avec en particulier la distinction à effectuer entre différents niveaux de représentation des systèmes. Il était considéré comme nécessaire d'effectuer une distinction entre des représentations de la structure, des comportements, des fonctions et des buts des objets modélisés.

L'exemple ci-dessus nous permet maintenant d'illustrer ces principes. En effet, sous CPAO, l'action d'attribuer des fonctions à un composant ou un système reste une question de point de vue et le résultat est par conséquent dépendant de l'utilisateur. Selon sa perspective il choisira ou non des fonctions *transporter l'eau* et *stopper l'eau*, qui sont probablement les plus évidentes. Mais dans le cas d'un système d'adduction d'eau potable, une fonction de *protection de l'eau* vis-à-vis des polluants et agents pathogènes paraît également légitime. Il en va de même pour une adduction d'eau usée : en plus de la fonction de *transport*, il serait possible d'attribuer une fonction de *protection* de l'environnement vis-à-vis d'agents pathogènes (qui sont situés dans la canalisation).

Pourtant, dans tous les cas, le comportement d'une canalisation reste le même : la matière ne traverse pas ses parois, un liquide présent à l'intérieur s'écoulera suivant la géométrie du dispositif. Sous CPAO les descriptions fonctionnelles restent valables tant qu'elles ont pour objet de décrire les attentes du modélisateur vis-à-vis du système, mais elles sont potentiellement fausses en tant que support à la simulation. Les rendre pertinentes pour la phase de propagation est possible,

mais cela implique une décomposition précise et parfois contre-intuitive des systèmes.

A.3.1.2. Prise en compte des effets des défaillances

Dans la version actuelle de CPAO, il est possible de décrire les effets des modes de dégradations, mais ces derniers ne sont pas appliqués au système.

La solution qui avait été retenue consistait à proposer les modes de dégradations détectés à l'utilisateur, les effets des dégradations étant décrit sous forme de pertes des fonctions. Une fois les effets appliqués aux composants ciblés, une nouvelle étape de migration devait être réalisée, entraînant le déplacement d'*agents environnementaux* au travers du système. Ces derniers pouvant à leur tour causer de nouvelles dégradations.

Ainsi, chaque dégradation doit être décrite avec un ensemble de fonctions qu'elle peut faire perdre à un composant. On peut comprendre de manière intuitive que la perte d'une fonction de type *stopper* implique que l'agent environnemental traverse le composant. Il est en revanche plus difficile de déterminer ce qui peut se passer dans le cas de la perte d'une fonction de type « *être conforme aux normes* » pour reprendre la terminologie employée sous CPAO.

De plus, il existe une autre façon de mettre à jour les enchaînements de modes de défaillances qui n'a pas été exploitée lors du développement de CPAO : en mettant à profit les relations entre fonctions secondaires et fonctions principales.

Ainsi si l'on décrit qu'un composant a pour fonction secondaire *stopper les températures basses* pour permettre à un autre composant B d'assurer sa fonction principale *être conforme aux normes - économie d'énergie*, il est tout à fait envisageable de considérer que la perte de la première fonction entraîne la perte de la seconde sans faire intervenir de migration.

Cette solution, si elle était appliquée en l'état, resterait limitée. À la différence des modèles fonctionnels décrits au chapitre A.2.2.3 les relations entre fonctions sous CPAO sont limitées à la relation fonction secondaire – fonction principale. Le FR Framework évoqué au chapitre A.2.2.3.2, par exemple, n'introduit pas de contraintes quant aux nombres de relations entre fonctions. À la différence de

CPAO, le niveau de décomposition fonctionnelle est adaptable et les effets de la défaillance d'une fonction peuvent être répercutés à différents niveaux.

A.3.1.3. Conclusions

Nous venons de voir que CPAO possède certaines limitations. Ces dernières sont à remettre dans leur contexte, qui est celui d'un outil dont l'ensemble des fonctionnalités n'a pas encore été implémenté. Ainsi, le développement de l'outil n'étant pas finalisé, il ne permet pas de prendre en compte des effets des modes de dégradations. Néanmoins nous avons identifié certains aspects qui sont liés à l'approche employée. Le tableau ci-dessous résume les points critiques que nous avons identifiés lors des différentes étapes d'utilisation de l'outil.

Fonctionnalités de CPAO	Résultats attendus	Avantages	Limitations
Réalisation d'analyse structurelle	Description de la structure du système étudié et détail de ses composants.	Capitalisation des connaissances de l'utilisateur relatives aux composants du produit. Réutilisation possibles des données existantes en bases.	-
Réalisation d'analyse fonctionnelle	Description fonctionnelle du système étudié permettant la mise à jour des modes de dégradations.	Structure et capitalise les connaissances de l'utilisateur relatives aux fonctions du produit, notamment en prenant en compte les relations entre fonctions (relation fonction principale/secondaires)	Etape fastidieuse et description fonctionnelle d'un composant difficile à réutiliser d'un système à un autre.
Migration des agents environnementaux	Mise à jour des modes de dégradations (« contacts » entre les AE migrés et les composants).	Permet l'identification automatique de certains modes de dégradation.	Seules les fonctions de type "stopper" ont été implémentées. Les descriptions fonctionnelles sont limitées et la construction d'un modèle fonctionnel simulable est difficile.
Construction des enchaînements de dégradations	Liste des scénarii de dégradation	Non implémenté	Non implémenté

Tableau 2. Fonctionnalités de CPAO

La construction de modèles fonctionnels simulables est nécessaire à la mise à jour des modes de dégradation, mais cette étape est contraignante. Il existe également un risque qu'une description fonctionnelle qui paraît intuitive ne soit pas adaptée à

la simulation fonctionnelle, avec pour conséquence un risque important de non-détection des dégradations.

Par ailleurs, la description de fonctions d'un produit reste une tâche fastidieuse. Il est demandé à l'utilisateur de détailler l'ensemble des relations entre fonctions principales et fonctions secondaires, alors que seule une partie de ces fonctions intervient lors de la phase de propagation des flux.

Nous notons également que ces descriptions fonctionnelles nous semblent difficilement réutilisables d'une étude à l'autre. D'une part il existe de nombreuses fonctions, dont la signification est parfois redondante (p. ex. *stopper la pluie* et *stopper l'eau*). D'autre part les relations fonctions principales/fonctions secondaires sont valables seulement dans un contexte donné (p. ex. un composant qui protège un autre d'un agent environnemental pour un système donné).

Pour résumer, il nous semble que certaines limitations sont liées au mode de représentation des systèmes sous CPAO :

- Parmi la liste des fonctions présentes en base, la majorité n'est pas adaptée à la simulation fonctionnelle ;
- Les fonctions sont attribuées au composant dans leur ensemble, sans pouvoir préciser de directivité ;
- Les descriptions fonctionnelles des composants ne sont pas réutilisables d'une étude à l'autre.

A.3.2. Choix d'un formalisme de représentation des systèmes

La partie A.2 détaille différents paradigmes de modélisations utilisables pour représenter des systèmes dans le cadre d'analyses des risques automatisées ou dans des domaines connexes. Nous rappelons ici les objectifs fixés en partie A : le cadre de modélisation doit servir de base pour la conception d'un outil d'aide à la conduite d'AMDE pour le domaine du bâtiment. Cet objectif général a été décliné en plusieurs sous objectifs :

- Faciliter la conduite d'une étude ;
- Diminuer le temps nécessaire à l'obtention des résultats ;
- Permettre le partage des connaissances ;
- Être applicable à l'ensemble des familles de produits du bâtiment.

Comme évoqué en introduction, nous avons proposé d'orienter notre travail en développant plus spécifiquement l'aspect automatisation. Nous avons également précisé que l'automatisation impliquait, pour nous, l'identification des modes de défaillances par l'outil ainsi que la déduction des effets de ces modes de défaillances sur le produit étudié.

Par ailleurs, notre problématique possède certaines spécificités qui doivent orienter notre choix. En premier lieu, le « domaine de modélisation » n'est pas défini de manière spécifique. Il serait théoriquement possible de définir un ensemble de systèmes et de comportements pour les produits et systèmes du bâtiment existant – cet ensemble constituant le domaine à modéliser – mais la prise en compte de l'innovation technologique ne serait pas assurée : de nouveaux systèmes et matériaux impliquent de nouveaux comportements et modes de dégradations.

De plus, les modes de défaillances ne sont pas uniquement rattachés aux composants décrivant le système. Les matériaux employés doivent également être pris en compte. Leurs causes sont multiples : interactions avec l'environnement ou avec d'autres composants du système, erreur de conception, etc. Il est important de pouvoir les identifier à partir de connaissances génériques telles que des phénomènes de dégradation.

A.3.2.1. Représentations qualitatives

Les logiciels FLAME et AutoSteve, décrits au chapitre A.2.3.2, sont basés sur une approche de type physique qualitative qui présente plusieurs aspects intéressants :

- La représentation des éléments du système est « simple » et facile à appréhender pour les utilisateurs (ils sont déjà spécialistes du domaine) ;
- Le modèle est simulable, ce qui permet de déterminer les effets des modes de défaillances des composants au niveau du comportement global du système ;
- Les modèles de composants sont réutilisables dans un contexte différent (c.-à-d. un autre circuit électrique).

Cependant, le mode de représentation employé dans FLAME ne s'applique qu'à une typologie de phénomènes limitée : la propagation du courant électrique dans un circuit. Les modes de défaillance des composants ne sont modélisés que dans la mesure où ils modifient le comportement des différents composants. La connaissance des causes « intrinsèques » des différents phénomènes (p. ex. vieillissement chimique au contact de l'environnement) n'est pas jugée nécessaire à la réalisation de l'AMDEC. Les effets de ces modes de défaillance seront ainsi toujours du même type : modifier le comportement du composant par rapport à sa capacité à agir sur un signal électrique. La modélisation puis la simulation qualitative ont pour seul objectif de déterminer les effets du mode de défaillance du composant sur le système dans son ensemble : l'apparition du mode de défaillance du composant est indépendante de l'état de fonctionnement du système, notamment de l'état, dégradé ou non des autres composants.

La problématique n'est pas la même en ce qui nous concerne car les modes de défaillances des composants ne sont pas connus *a priori*. Un outil d'AMDE adapté à notre problématique doit pouvoir guider l'utilisateur lors de l'étude d'un système en intégrant ses connaissances relatives aux défaillances d'un produit, mais également les connaissances décrites par d'autres utilisateurs, parfois dans un contexte différent. Par ailleurs, à la différence de FLAME, nous ne pouvons considérer *a priori* que les dégradations des parties d'ouvrage sont indépendantes les unes des autres : les effets d'un mode de dégradation peuvent modifier directement les fonctions principales d'un système ou provoquer l'apparition d'autres dégradations.

Néanmoins, nous utiliserons certains des concepts généraux sur lesquels se base cette approche :

- Le concept de modèle de composants réutilisables, qui fait défaut à CPAO ;
- La notion de label fonctionnel.

L'exemple développé par Lair, décrit au chapitre A.2.2.2.2, s'il se base aussi sur une représentation qualitative de la physique, s'attache à décrire un phénomène plutôt que le comportement global d'un système. Ce mode de représentation paraît inadapté à notre problématique. En effet, le graphe causal, relatif à la carbonatation du béton armé, comporte 27 variables et 28 relations causales pour un seul phénomène, alors que l'étude d'un capteur photovoltaïque décrite dans (Hans, 2007) a mis à jour deux cents modes de dégradations distincts appliqués à une dizaine de composants. Le graphe causal équivalent décrivant l'ensemble des phénomènes de dégradations du capteur photovoltaïque serait trop complexe à construire et à appréhender.

De plus, dans l'hypothèse où la création d'un tel modèle reste envisageable, la question de la réutilisation de ses éléments reste posée. S'assurer de la réutilisabilité de chaque élément du modèle implique une approche globale et une connaissance des systèmes et phénomènes à modéliser, ce que nous ne pouvons assurer *a priori*. Cet aspect ne sera pas développé plus en détail, le lecteur intéressé par ces questions pourra néanmoins se référer à Bredeweg et col. (Bredeweg, 2008), qui décrivent une approche méthodologique pour développer de tels modèles.

A.3.2.2. Représentations fonctionnelles

Nous avons abordé deux types de représentation fonctionnelle. La première, la représentation à base d'états s'est révélée difficile à utiliser en pratique lors de son utilisation dans (Price 1997) : les mises en application ont montré que les utilisateurs rencontraient des difficultés à manipuler ces descriptions fonctionnelles.

Chandrasekaran note également qu'à un même objet peuvent correspondre des modèles fondamentalement différents en fonction de la perspective du modélisateur (Chandrasekaran, 1994). Selon nous, cela entre en contradiction avec notre objectif

de réutilisation des descriptions des systèmes. Ces considérations nous semblent suffisantes pour écarter ce type de représentation.

Les représentations fonctionnelles à base de flux nous paraissent en revanche plus adaptées à notre problématique, principalement parce qu'elles constituent simultanément un cadre large et adaptable : elles permettent de représenter de manière simplifiée des fonctionnalités rattachées à de nombreux domaines de la physique (thermique, acoustique, mécanique, etc.). De plus, les principaux types de fonction et de flux pouvant être fixés par avance, l'ensemble des modèles fonctionnels devra nécessairement être décrits avec le même vocabulaire, ce qui facilite leur réutilisation.

A.3.3. Conclusions

Une automatisation complète de l'AMDE nécessite de disposer de modèles simulables des comportements nominaux et défaillants, ce qui implique de délimiter *a priori* un domaine de validité de ces modèles. Il est possible d'adopter ce type d'approche dans certains cas (notamment FLAME et AutoSteve), où le domaine à modéliser est connu et où il est possible de constituer *a priori* des bibliothèques de modèles de composants fonctionnels et défaillants. Or nous ne remplissons aucune de ces deux conditions. Nous proposons néanmoins de définir un cadre de modélisation visant à permettre une description des systèmes qui soit adaptée à notre problématique.

Le Tableau 3 reprend les types de représentations que nous avons abordées jusqu'ici et présente leurs points positifs et négatifs vis-à-vis de plusieurs critères :

- La facilité de description des modèles par un utilisateur. Sont pris en compte ici le niveau de connaissances relatives aux produits ainsi que le caractère intuitif des représentations ;
- Les possibilités d'automatisations, qui sont entendues comme la capacité à indiquer les modes de défaillances potentiels ainsi que leurs effets au niveau du système (perte de fonction ou nouveau mode de défaillance) ;
- Les possibilités de réutilisation de connaissances, critère que nous limitons ici à la réutilisation des modèles des produits par un autre utilisateur que celui qui les a construits.

La lecture de ce tableau nous conduit à nous orienter vers une représentation fonctionnelle à base de flux. Nous retenons ainsi une description fonctionnelle des systèmes à deux niveaux. Le premier, basé sur un ensemble de fonctions et de flux restreint, vise à permettre la construction de modèles des systèmes simulables permettant la mise à jour des modes de dégradation. Le second, basé sur une approche de marquage fonctionnel, vise à permettre une représentation plus explicite des fonctions principales d'un composant ou d'un système.

L'enjeu est également de permettre la description de modèles de composants réutilisables. Il est évident que nous ne pouvons constituer, *a priori*, des bibliothèques de modèles de composants pour l'ensemble des systèmes vu la diversité des composants du bâtiment. Par conséquent, la conduite de l'AMDEC ne peut se faire de manière similaire (par remplacement du modèle de composant dans un état nominal par un modèle défectueux).

Nous proposerons donc une description des modes de dégradation dont les effets sont exprimés en termes de modification des fonctions des composants. L'objectif étant, comme dans le cas de CPAO, de pouvoir identifier les effets d'un mode de dégradation, non seulement d'un point de vue fonctionnel, mais également au travers d'un mécanisme similaire à la migration des *agents environnementaux*. Pour cela nous développerons une hiérarchie de flux et de fonction adaptée au domaine du bâtiment.

Critères		Types de représentation				Spécifique au logiciel CPAO
		Qualitative (réseau causal)	Qualitative (Flame)	Fonctionnelle à base d'état	Fonctionnelle à base de flux	
Description des modèles des produits	Influence sur la tâche de modélisation des systèmes	<p>- Limité : Nécessite une compréhension poussée des phénomènes.</p> <p>- Limité : La description de nombreuses variables et relations rendent le graphe complexe à construire.</p>	+ Simple à partir d'une base de données de composants préconstruite.	- Limité : Difficultés connues pour construire les modèles.	+ Simple : représentation a priori intuitive. - Limité par l'ensemble flux/fonction choisi.	<p>+ Simple : Description simple de la topologie des produits.</p> <p>- Limité : Description fonctionnelle complexe.</p>
Possibilités d'automatisation	Simulation ou expression du comportement nominal	+ Oui . Sous forme de valeur de variables d'état.	+ Oui , par simulation qualitative. - Limité : à la propagation de courant électrique	+ Oui , simulation (relations entre fonctions).	+ Oui , représentation (relations entre fonctions).	+ Oui , (relations entre fonctions). - Limité pour la simulation (migration) : fonction « stopper » uniquement.
	Mise à jour des modes de dégradation à partir d'une base de données de phénomènes génériques.	Sans objet : aucune approche identifiée dans la littérature.	- Limité : Uniquement à partir d'une liste de composants défaillants. Pas de prise en compte de l'environnement comme cause de dégradation.	Sans objet : aucune approche identifiée dans la littérature.	Sans objet : aucune approche identifiée dans la littérature.	+ Oui . Met à jour certains modes de dégradation via migration des agents environnementaux. - Limité : migration partiellement implémentée.
	Possibilité de déduire les effets d'un mode de défaillance au niveau système.	Sans objet : aucune approche identifiée dans la littérature.	+ Oui , par simulation qualitative.	+ Oui , via les relations entre fonctions.	+ Oui (via les relations entre fonctions ou propagation des flux).	- Limité : Possible par propagation des flux mais non implémenté.
Possibilité de réutilisation des connaissances	Réutilisation des modèles des systèmes.	+ Oui : Phénomènes et variables explicités. - Limité : Réutilisation d'un modèle dans un autre contexte nécessite d'expliciter de nouvelles variables.	+ Oui . Développement de bibliothèques de composants.	- Limité : Modèles fonctionnels très dépendants de la perspective du modélisateur.	+ Oui , modèles construits à partir d'un ensemble de flux et de fonctions commun.	+ Oui : données de bases (type de matériaux, agents environnementaux) réutilisables. - Limité : descriptions fonctionnelles non réutilisables.

Tableau 3. Tableau de synthèse des modes de représentation

Partie B .

Développement d'un
cadre de modélisation

B.1. Démarche

Le présent chapitre présente, en guise d'introduction, une description générale du cadre de modélisation que nous proposons. Les différents concepts que nous employons y sont décrits, ainsi que le cadre dans lequel nous proposons de les utiliser pour construire des modèles de systèmes, simuler le comportement de ces systèmes et mettre à jour leurs modes de dégradations potentiels.

Ces notions sont reprises plus en détail dans les parties suivantes. Le chapitre B.2 décrit les différents éléments permettant la construction des modèles. La manière dont ils doivent être utilisés est abordée au chapitre B.3.

B.1.1. Description générale du cadre de modélisation

Le cadre de modélisation que nous allons décrire dans cette partie vise à permettre la description de tout produit de construction d'un point de vue structurel et fonctionnel ainsi que l'identification de ses modes de défaillances et de leurs effets.

Nous utiliserons le terme *système* pour désigner l'objet modélisé. Un système pourra éventuellement être un produit de construction considéré hors contexte, mais il sera généralement constitué d'un produit dans son environnement immédiat : autres parties d'ouvrage et environnements intérieur et extérieur.

Les systèmes sont modélisés comme des réseaux de *composants* liés entre eux par des *contacts*. Ces composants sont également en contact avec des *milieux* représentant les environnements dans lesquels le produit sera utilisé durant sa vie en œuvre. Chaque contrainte environnementale présente dans un environnement est représentée par un ou plusieurs *flux*. Les flux permettent, d'une part, d'exprimer le comportement du système, d'autre part de mettre à jour certains modes de dégradation.

Les composants représentent des parties physiques des systèmes. Chaque composant possède un certain nombre d'interfaces spécifiques, appelées *ports*, par lesquels il est mis en contact avec les autres éléments du système. Au sein d'un composant, des *liaisons* définissent les comportements du composant d'un port à un autre vis-à-vis des flux. Ces liaisons sont donc une mise en relation entre une

fonction et un type de flux, l'ensemble (flux/fonctions) vise à permettre la description simplifiée et qualitative d'une large palette de phénomènes physico-chimiques (mécanique, thermique, électrique, etc.). Accessoirement, chaque composant possède un certain nombre de propriétés complémentaires, comme un ou plusieurs matériaux constitutifs, une appartenance à une famille, etc.

Le comportement d'un système vis-à-vis des flux provenant des milieux peut ainsi être déduit de celui de ses composants. Un flux provenant d'un milieu sera ainsi « traité » par une succession de composants en fonction des liaisons qui leur ont été attribuées. Le traitement de l'ensemble des flux par un système est appelé *simulation fonctionnelle*. Parmi l'ensemble des flux qui traversent le système certains sont identifiés comme étant liés aux fonctions principales dudit système. Ces derniers seront alors différenciés à l'aide de *marqueurs fonctionnels*.

Le trajet de l'ensemble des flux provenant des milieux au sein des composants décrit ainsi le *comportement nominal* du système, comportement dont les aspects les plus marquants sont identifiés à l'aide des marqueurs fonctionnels.

Il reste ensuite à prendre en compte l'évolution de ces comportements sous l'effet des *modes de dégradations*. Ces derniers représentent l'ensemble des phénomènes qui peuvent modifier les fonctionnalités d'un système lors de sa vie en œuvre et qui sont généralement causés par les environnements en service ou par une erreur de mise en œuvre. Dans certains cas, il est également possible de prendre en compte les erreurs de conception.

Les modes de dégradations des composants sont décrits selon le formalisme général de l'AMDEC (causes, cibles, effets). Les dégradations sont déclenchées quand les conditions de causes et de cibles sont présentes simultanément. Les causes peuvent être de différentes natures, principalement la présence d'un flux, le contact avec un composant incompatible, un possible problème lors de la mise en œuvre ou la fabrication, etc.

Les effets des dégradations sont décrits en termes de modification des liaisons. Ainsi, appliquer une dégradation à un modèle de composant revient à modifier son comportement par rapport aux flux.

Cette modification du modèle de composant est directement répercutable sur le modèle du système. Le modèle de composant modifié par la dégradation agissant différemment sur les flux, leur propagation au sein du système s'en trouve modifiée. Cela a deux conséquences :

- De nouveaux flux pourront éventuellement atteindre des parties du système auxquelles ils n'avaient pas accès, déclenchant à leur tour de nouvelles dégradations ;
- Le nouveau comportement peut être en contradiction avec les marqueurs fonctionnels, indiquant ainsi qu'une des fonctionnalités importantes du système a été modifiée.

La succession des dégradations prises en compte ainsi que la propagation des flux qui en résulte définit un *arbre d'états* du système. L'état initial est défini par le fonctionnement nominal du système et chaque nœud ou embranchement est un nouvel état dû à un mode de dégradation d'un composant.

Quand un état du système est en contradiction avec les comportements nominaux définis par les marqueurs fonctionnels on parle de *défaillance du système*.

L'arbre d'état étant une représentation exhaustive et spécifique au cadre de modélisation, il doit par la suite être traduit en *arbre de défaillance* qui décrit de manière plus condensée et plus explicite l'enchaînement des phénomènes de dégradations qui conduisent à la ruine du système.

L'ensemble de ces notions est décrit de façon globale Figure 0-1 et sera repris de manière détaillée dans la partie suivante.

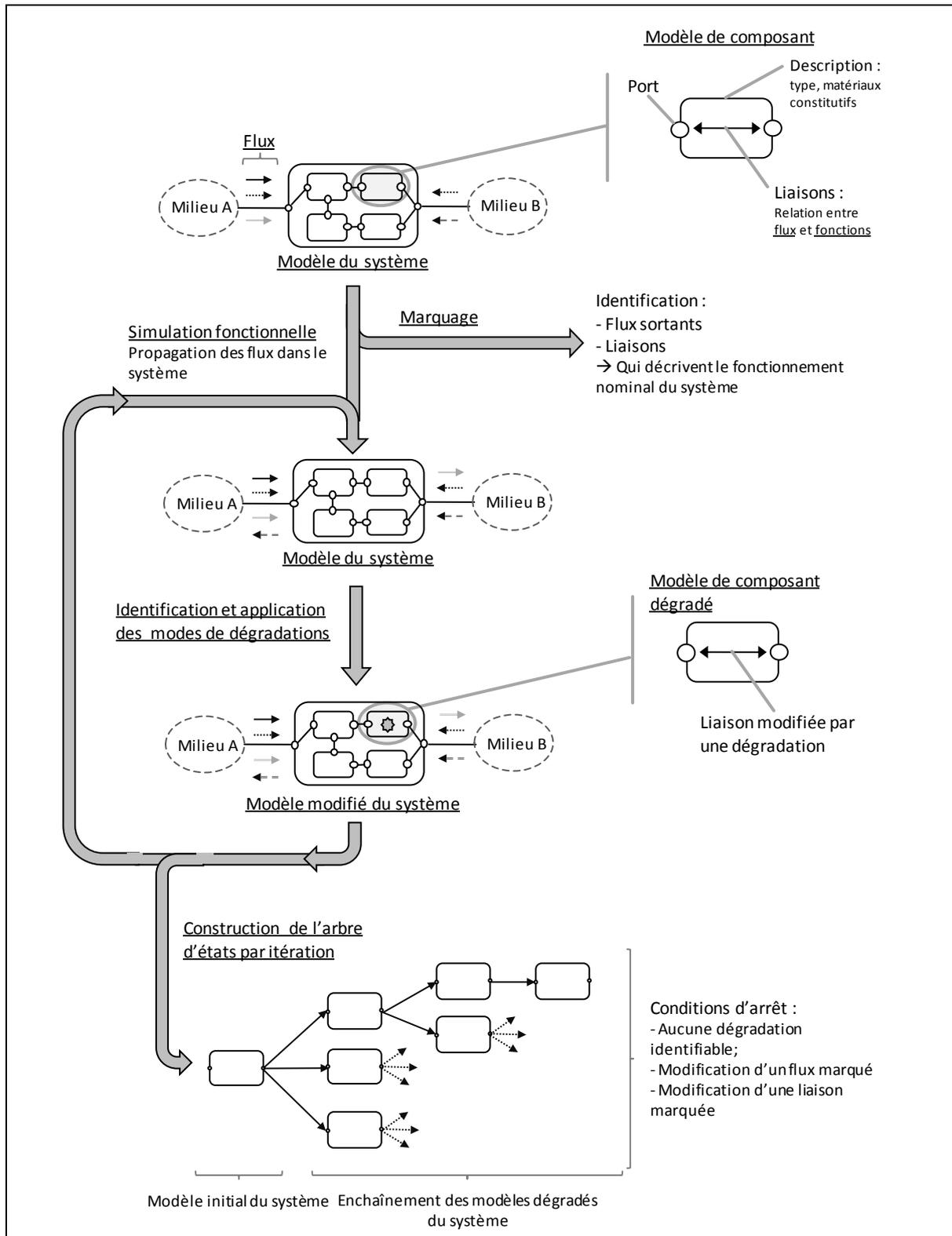


Figure 0-1. Utilisation des modèles de systèmes et de composants

B.2. Éléments clés du cadre de modélisation

B.2.1. Description des flux et milieux

Les *milieux* constituent les frontières des systèmes étudiés. Ils peuvent être des environnements (environnement intérieur d'un ouvrage par exemple), ou d'autres parties d'ouvrage qui interagissent avec le système (p. ex. le bâti). Les milieux sont décrits par agrégation d'un ensemble de flux (cf. Figure 0-2).

Les *flux* représentent l'ensemble des contraintes auxquelles les systèmes sont confrontés durant leur vie en œuvre. Leur rôle au sein du cadre de modélisation est double. D'une part, ils permettent de décrire les modes de fonctionnement des systèmes étudiés (et de leurs composants) en termes d'entrées et sorties. D'autre part, ils sont la cause de certains modes de dégradations.

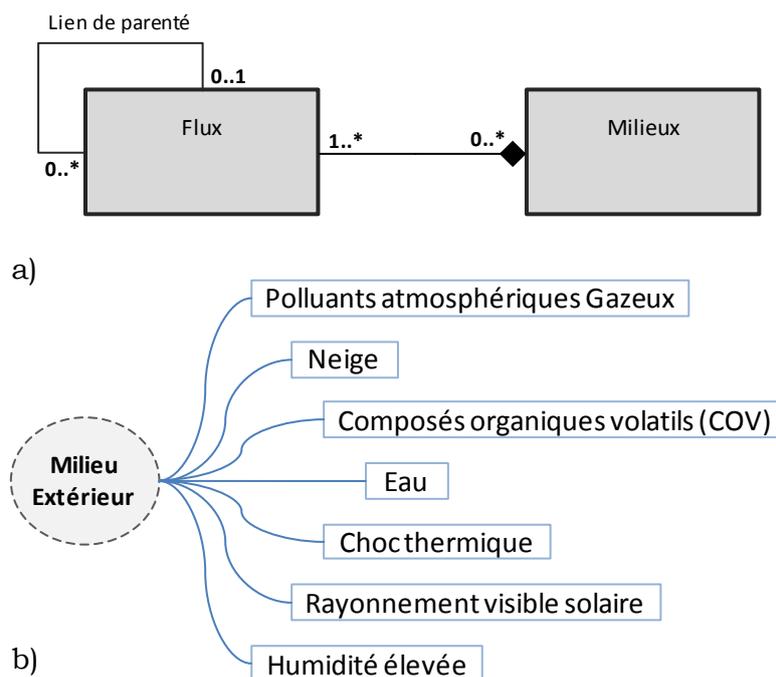


Figure 0-2. a) Modèle de classe flux et milieux et b) exemple de milieux et de flux associés

Les flux sont organisés comme une hiérarchie de type développée sur la base des travaux de Stone et Coll. précédemment évoqués au chapitre A.2.2.3 (Stone, 2000). La construction de cette taxonomie a été réalisée en deux temps. Dans un premier temps les types de flux génériques ont été utilisés pour développer une taxonomie

permettant la description des comportements des systèmes constructifs (cf. figure Figure 0-3-a). Dans un second temps, un travail de classification a été mené afin d'attribuer à chaque type de flux les différents agents environnementaux issus de CPAO (cf. Figure 0-3 b). Trois principales catégories de flux existent : matériaux, énergie et pseudo-flux. Les deux premières sont héritées de la taxonomie de (Stone, 2000), la dernière regroupe l'ensemble des flux qui ne participent pas au comportement des systèmes, mais uniquement aux dégradations.

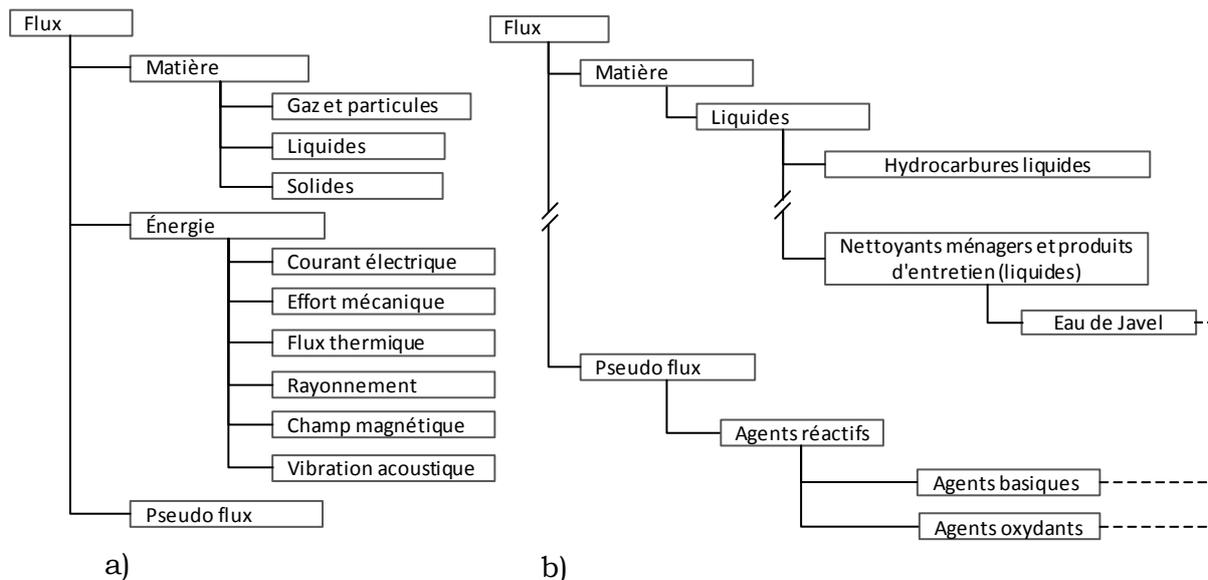


Figure 0-3. a) principaux types de flux, b) exemple et relations entre flux

Les comportements de composants seront décrits au niveau des types de flux les plus généraux tels qu'ils sont listés Figure 0-3-a, et les défaillances au niveau des types de flux les plus spécifiques.

B.2.2. Description d'un composant

Chaque système modélisé est subdivisé en un ensemble de composants qui représente une de ses parties physiques. Vu la diversité des systèmes à modéliser – l'ensemble des systèmes constructifs – cette décomposition doit nécessairement pouvoir être effectuée de manière « souple », notamment vis-à-vis de sa granulométrie. Tout comme les limites d'un système sont définies par ses composants, les limites d'un composant sont définies par ses ports. Nous ne proposons pas de restriction quant au choix de ces frontières. Ainsi, on peut définir des systèmes de manière relativement détaillée avec une décomposition fine, à une

échelle plus macroscopique. Il est également possible d'utiliser plusieurs échelles de description au sein d'un même système (certains composants détaillés, d'autres non). Certains types de décomposition présentent néanmoins un intérêt, nous pouvons en identifier trois :

- Décomposition selon une continuité de matière ;
- Décomposition selon une continuité typologique : Correspond à un type d'objet tel qu'il est produit ou mis en œuvre (p. ex. un isolant en laine minérale avec pare-vapeur intégré) ;
- Décomposition selon une continuité fonctionnelle.

Ces trois niveaux ne sont pas nécessairement exclusifs. Par exemple une tuile canal présente les trois niveaux de continuité. Cette absence de contraintes quant au choix des frontières des objets à modéliser implique qu'il est possible de modéliser le même système de plusieurs manières différentes, comme illustré par la Figure 0-7. Les composants sont vus comme des objets. Ils possèdent donc un certain nombre de propriétés ainsi que des relations avec d'autres objets. Ces dernières sont résumées par le modèle de classe simplifié présenté Figure 0-4.

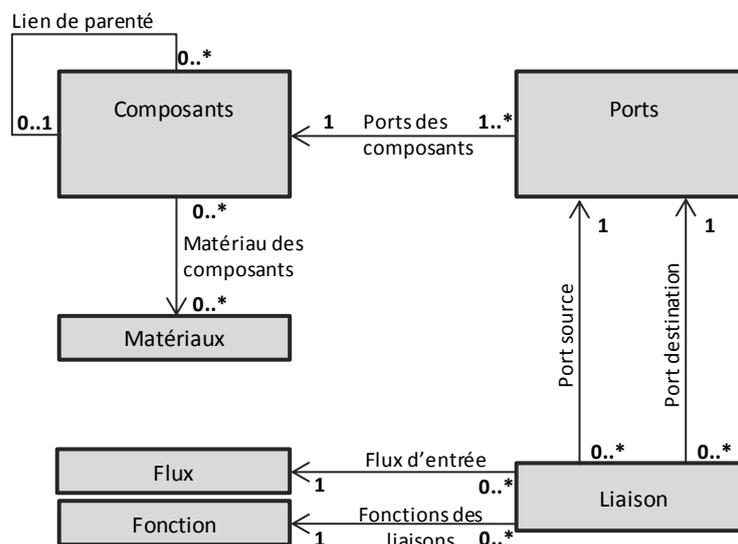


Figure 0-4. Diagramme de classe simplifié orienté vue composant

Dans la suite de ce texte nous utiliserons également une représentation graphique décrite en Figure 0-5.

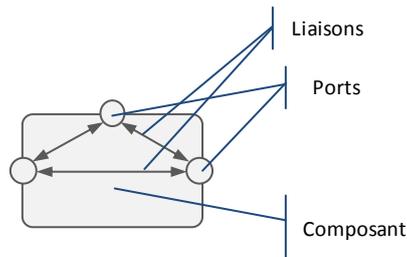


Figure 0-5. Représentation d'un modèle de composant

Les composants possèdent plusieurs propriétés ayant différentes fonctionnalités :

- les *ports* et *liaisons*, qui seront abordés parties B.2.3 et B.2.4, visent à permettre la représentation fonctionnelle du composant au sein d'un système ;
- les *matériaux* constitutifs du composant et son *type* permettent de déterminer s'ils peuvent être la cible de phénomènes de dégradation ;
- Une dernière catégorie regroupe l'ensemble des attributs liés à l'utilisation de l'objet vis-à-vis des utilisateurs (texte descriptif).

Un ou plusieurs *types de matériaux* peuvent être attribués au composant. Les matériaux sont à sélectionner parmi les items d'une typologie dont les principaux types sont présentés Figure 0-6.

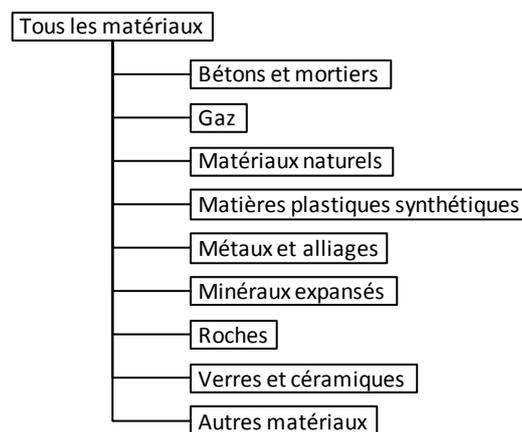


Figure 0-6. Principales classes de matériaux

Les *types de matériaux* sont organisés de façon hiérarchique selon une relation parent-enfant permettant une description des composants plus ou moins spécifiques en fonction des connaissances disponibles. Ainsi dans le cadre de l'étude d'un système mal connu ou encore en phase de conception il est possible de

faire appel à des *types de matériaux* génériques (p. ex. *métaux et alliages*), alors qu'une description plus fine sera possible dans le cas de systèmes connus (p. ex. une nuance d'alliage : *X12CrNi18-08*, un acier inoxydable austénitique). De la même manière, les *types de composants* sont organisés selon le même mode de classification. Les composants n'héritent pas pour autant par défaut des attributs de leurs parents, ainsi préciser qu'un composant est le sous-type d'un autre permet uniquement de lui attribuer les mêmes modes de dégradations.

B.2.3. Représentation des ports

Un port représente une surface spécifique du composant, interface par laquelle le composant va interagir avec les autres éléments du système (autres composants et milieux). Un composant a donc au minimum autant de ports qu'il a de contacts avec d'autres composants et des milieux. Les ports permettent des mises en contact qui sont assurées par des liaisons externes. Le placement des ports vise à permettre une représentation adéquate d'une part de la topologie du composant, d'autre part de ses fonctions, les secondes étant tributaires de la première. Par adéquate, on entend adaptée au cadre de l'étude et aux besoins de modélisation. S'il est possible et souhaitable de constituer des bibliothèques de composants génériques, la définition des ports d'un composant est réalisée par défaut dans un contexte donné : celui du système dont le composant fait partie. Un même objet peut donc être modélisé différemment en fonction de ce contexte, ce qui influe sur sa capacité à être réutilisé d'une étude à l'autre. Deux paramètres entrent en compte :

- le niveau de granularité de la décomposition ;
- l'environnement décrit par le cadre de l'étude.

La Figure 0-7 illustre le placement des ports d'un même objet décrit à deux niveaux de granularité différents.

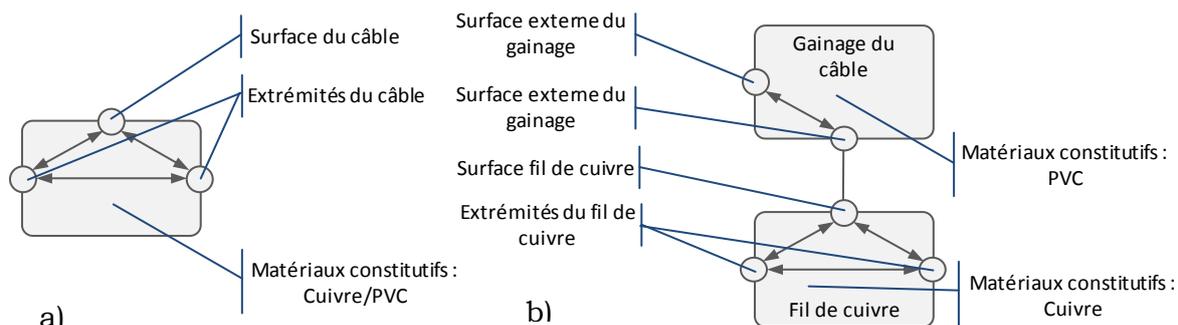


Figure 0-7. Définition des ports de deux modèles de câbles conducteurs exprimés à différents niveaux de granulométrie a) mono-composant et b) mono-matériau.

La Figure 0-8 représente un composant décrit au même niveau de granularité que celui de la Figure 0-7 a), mais le contexte d'utilisation du composant a changé : la prise en compte d'un autre composant (fixation du câble) conduit à représenter un second port « gainage du câble ».

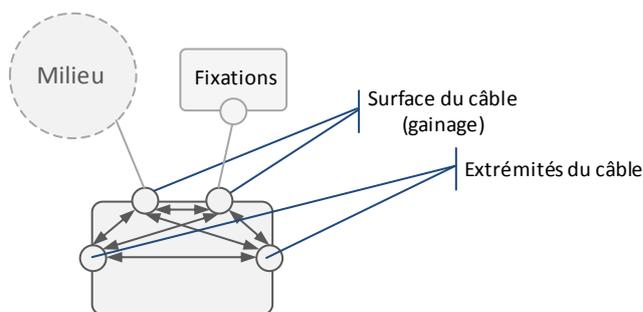
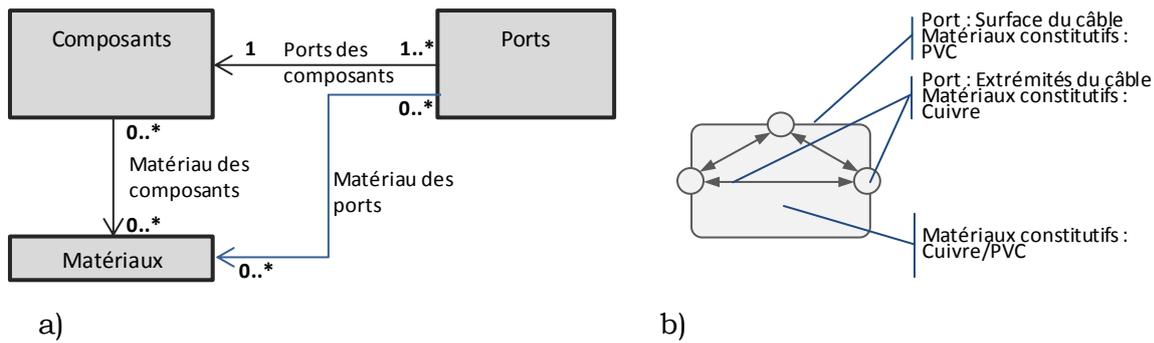


Figure 0-8. Définition des ports

Cet exemple illustre que le modèle d'un composant peut nécessiter des modifications en fonction du contexte dans lequel il est employé. Ainsi, pour réutiliser un composant donné d'une étude à l'autre il sera parfois nécessaire d'ajouter ou de retirer un port et de modifier certaines liaisons. Cela distingue nos travaux de ceux de Price et coll. (Price, 1998), décrit au chapitre A.2.3.2, qui s'appuient également sur une représentation à base de composant.

Une relation entre les objets *port* et *matériaux* est également ajoutée. Lors de la recherche des dégradations, l'algorithme recherche les cibles et causes de type matériaux indifféremment sur les ports et les composants. La figure 0-9 ci-dessous présente le modèle de classe simplifié effectivement implémenté ainsi qu'un modèle de composant.



0-9. Prise en compte des matériaux constitutifs des ports : a) modèle de classe implémenté et b) représentation d'un modèle de composant.

B.2.4. Représentation des liaisons

Les liaisons permettent de définir les comportements des composants vis-à-vis des flux. Elles sont décrites d'un port à un autre du composant sous forme de relation entre flux et fonctions. La figure 0-10 présente la typologie simplifiée des flux (figure a) et la typologie simplifiée des fonctions (figure b). Leur construction est décrite plus en détail au chapitre B.4.2.

Ces typologies, inspirées des travaux de (Stone, 2000) pour la partie flux et dans une moindre mesure de ceux de (van Paassen, 1999) pour la partie fonction, visent à permettre une description simplifiée d'une vaste palette de phénomènes physiques. Le détail des flux implémentés dans le prototype d'outil est décrit au chapitre B.4.2.

Le fait d'attribuer une liaison à un composant est une opération similaire à l'attribution de fonctions (principales ou secondaires) sous CPAO (cf. chapitre A.2.4), à la différence que les liaisons sont décrites pour un couple de ports donné (cf. Figure 0-11) au lieu d'être attribués à l'ensemble du composant.

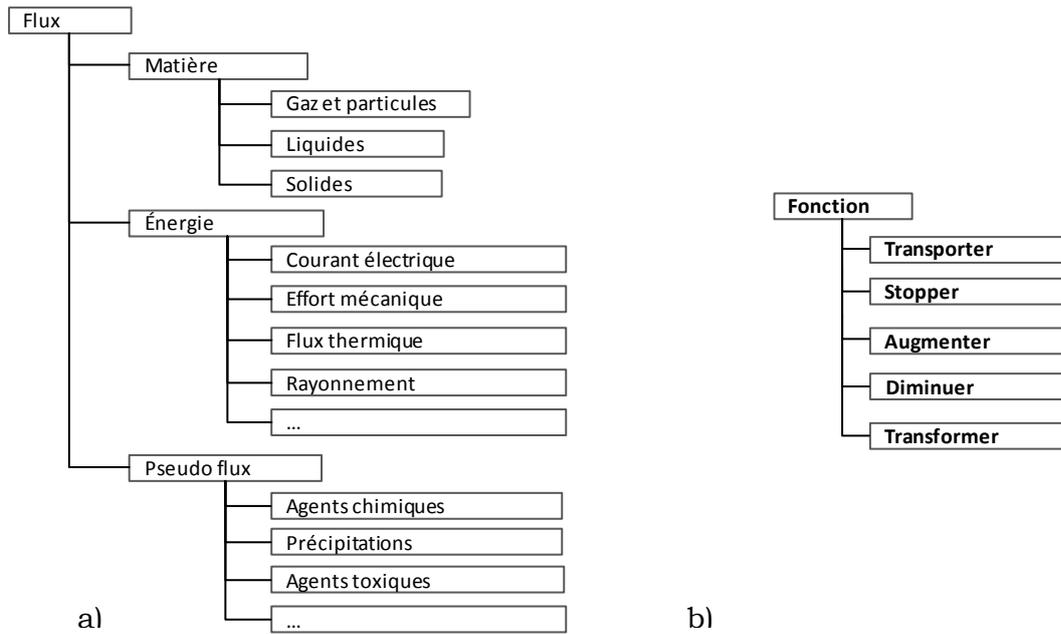


Figure 0-10. a) Extraits de la typologie des flux et b) Typologie simplifiée des fonctions

La description complète d'un modèle de composant comporte idéalement une liaison, pour chaque couple de ports et pour chaque type de flux, de sorte qu'une fois utilisé au sein d'un modèle de système le modèle de composant puisse répondre à tout type de sollicitation. De manière générale, on cherchera à obtenir une description la plus générique possible. La classification des flux sera ainsi mise à contribution pour permettre une écriture condensée des fonctions : une liaison relative à un flux s'applique aussi aux flux du même type (les flux enfants).

La Figure 0-11 présente un exemple de description des liaisons du modèle de composant d'un vitrage simple décrit avec deux ports, chacun représentant une des faces de la plaque de verre.

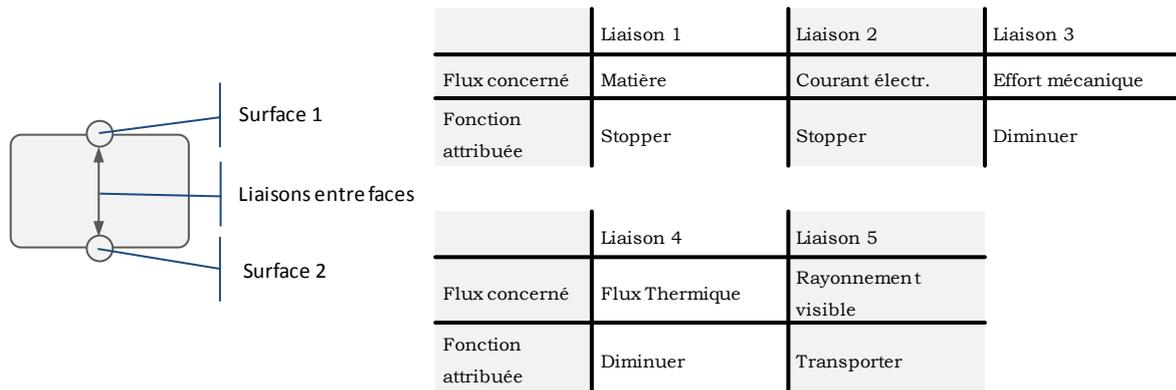


Figure 0-11. Liaisons d'un modèle de composant (vitrage).

Dans le cadre d'une approche quantitative, les comportements seraient décrits par des lois physiques qui seraient représentées sous forme d'équations avec pour paramètres d'entrées les cotes de l'objet modélisé et les constantes décrivant les propriétés du matériau. Ici les liaisons sont une description fonctionnelle condensée destinée à rendre compte de la topologie de l'objet et ses caractéristiques physiques.

Ainsi, il est évident qu'à partir d'un certain niveau de granularité, les liaisons peuvent être déduites des propriétés des matériaux constitutifs des composants et de leur géométrie. Par exemple, la liaison 2 de la Figure 0-11 « stopper le courant électrique » peut être directement déduite du caractère diélectrique du matériau « verre trempé ». Il en est de même pour la liaison 5 « transporter le rayonnement optique » qui permet de prendre en compte le caractère transparent du verre.

Ces descriptions ont pour objet une physique « naïve », mais comme pour toutes les approches qualitatives, il n'est pas possible d'éviter les ambiguïtés. Ainsi, le composant de l'exemple n'est pas, en toute rigueur, complètement transparent au rayonnement visible, puisqu'une vitre en verre trempé transmet généralement entre 85 et 90% de rayonnement perçu. En pratique, il est tout autant envisageable d'attribuer une fonction « limiter » à cette liaison. L'annexe 5 décrit, à titre indicatif, la signification possible des principaux types de liaisons.

Lors de la description des comportements des composants *via* les liaisons, tous les flux d'un même type sont traités de la même façon et simultanément. Ainsi une liaison *transporter les liquides* signifie que tous les liquides passent au composant suivant. Tous les agents environnementaux de type *liquides* seront donc

« déplacés », sans distinction quant à leur nature et surtout sans prise en compte des aspects temporels.

En somme, une liaison décrit un comportement possible d'un composant et la présence d'un flux sur un port décrit une *présence possible* de ce flux dans le système. Sur la base de cette présence, des modes de dégradations sont proposés, la pertinence de ces modes de dégradations relève *in fine* du choix du modélisateur.

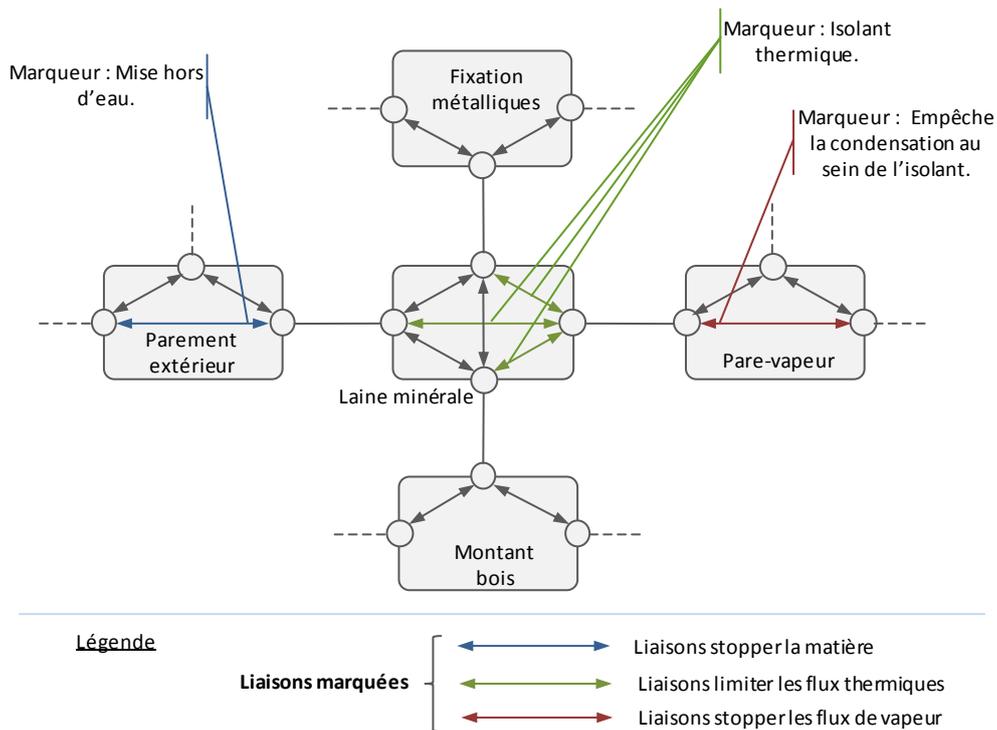
B.2.5. Marqueurs fonctionnels

Le mode de représentation des fonctions que nous avons développé jusqu'à présent vise à permettre une représentation de l'ensemble des fonctionnalités des systèmes constructifs. Il présente néanmoins certaines limitations par rapport aux autres types de descriptions fonctionnelles que nous avons abordées, notamment le fait qu'il ne propose pas d'identifier des relations hiérarchiques entre fonctions. Ainsi il n'existe pas d'équivalent pour les fonctions principales de CPAO par exemple.

De plus, nous avons vu qu'il était souhaitable de constituer des modèles de composants possédant des liaisons relatives, *a minima*, aux principaux types de flux pour garantir la pertinence de la simulation fonctionnelle. Cela peut conduire à des descriptions des systèmes parfois complexes : plusieurs dizaines de liaisons pour un composant donné et, à l'échelle produit, plusieurs dizaines de chemins pour un même flux.

Price *et coll.* (Price, 1997) utilisent des marqueurs fonctionnels, superposés à une représentation qualitative du comportement des systèmes, pour aider à la détermination des effets des modes de défaillances. Ces marqueurs fonctionnels sont des descriptions rattachées aux composants (ce qui, d'après les auteurs, les rend réutilisables) et font correspondre une fonction à un état du composant (p. ex. *produire de la lumière* peut être un label fonctionnel d'une ampoule traversée par un courant électrique).

Nous proposons d'utiliser une représentation similaire, qui, au lieu d'être liée à un état du composant, serait liée à une ou plusieurs de ces liaisons, comme l'illustre la figure 0-12.



0-12. Exemple d'assignation de marqueurs fonctionnels, extrait d'un système mur porteur

Les marqueurs fonctionnels ne sont qu'un champ texte associé à l'objet liaison. Ils possèdent trois fonctionnalités :

- Permettre une identification des fonctions principales des systèmes ;
- Permettre une identification plus aisée des modes de dégradation (ils peuvent servir de condition d'arrêt lors de la recherche des défaillances) ;
- Permettre d'exprimer des fonctionnalités au niveau système sans passer par la propagation des flux.

B.2.6. Représentation des dégradations

Les modes de dégradations des composants sont globalement décrits en reprenant le formalisme général de l'AMDEC (causes, cibles, effets) et plus spécifiquement la manière dont il avait été interprété sous CPAO. Ils peuvent affecter un *type de composant* ou un *type de matériaux* ou une combinaison des deux. Dans tous les cas, on considère que les sous-types sont également affectés. Les causes peuvent être de différente nature :

- La présence d'un flux au contact de la cible ;

- Une incompatibilité entre le type de matériau de la cible et celui d'un composant en contact avec la cible ;
- Une erreur de conception, mise en œuvre, etc. regroupées sous le terme de défaut initial ;
- L'existence d'une autre dégradation active.

Cibles et causes décrivent les conditions d'activation des dégradations, qui sont les conditions pour lesquelles la dégradation devrait être spontanément proposée à l'utilisateur. Les effets des dégradations sont de deux types :

- modification des liaisons de la cible ;
- application directe d'un autre mode de dégradation.

Les relations entre ces concepts sont décrites Figure 0-13.

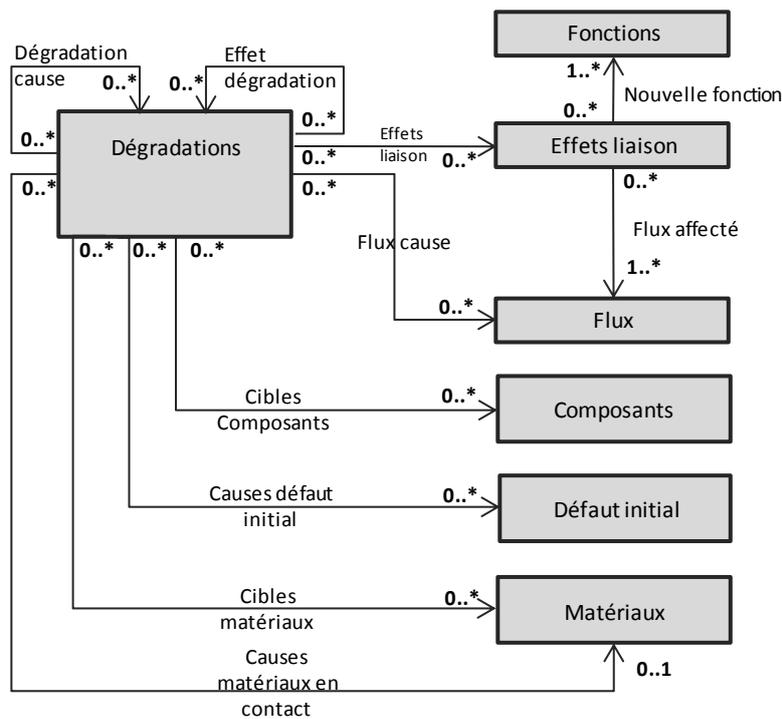


Figure 0-13. Dégradations : Modèle de classe simplifié.

Un exemple de mode de dégradations simple est décrit Figure 0-14.

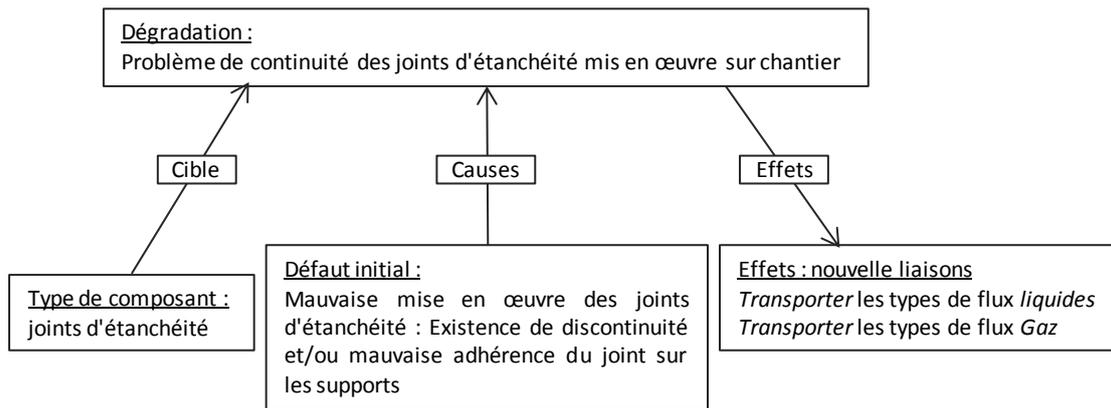


Figure 0-14. Exemple de mode de dégradation

La description des effets des dégradations en termes de modification des liaisons des composants est nécessaire : elle permet une modification directe du composant modélisé et, par propagation des flux, une prise en compte des effets à l'échelle du système. L'ensemble de ces notions est illustré au chapitre B.3.3.

B.3. Utilisation du cadre de modélisation

L'enjeu de ce chapitre est d'illustrer la mise en application du cadre de modélisation d'un point de vue théorique. Nous avons présenté au chapitre B.2 les différents éléments qui le composent (composants, ports, dégradation, etc.) ; nous proposons maintenant d'illustrer la manière dont ces éléments peuvent être articulés pour représenter un système dans ses états nominaux et dégradés. Les concepts précisés dans le présent chapitre visent également à servir de base au développement d'un prototype d'outil logiciel qui sera abordé au chapitre B.4 « Développement d'un prototype d'outil ».

B.3.1. Représentation structurelle d'un système

Un modèle de système est construit à partir de modèles de composants qui sont mis en contact *via* leurs ports (cf. Figure 0-16). La figure ci-dessous illustre le modèle de classe simplifié utilisé pour représenter les relations entre ces concepts.

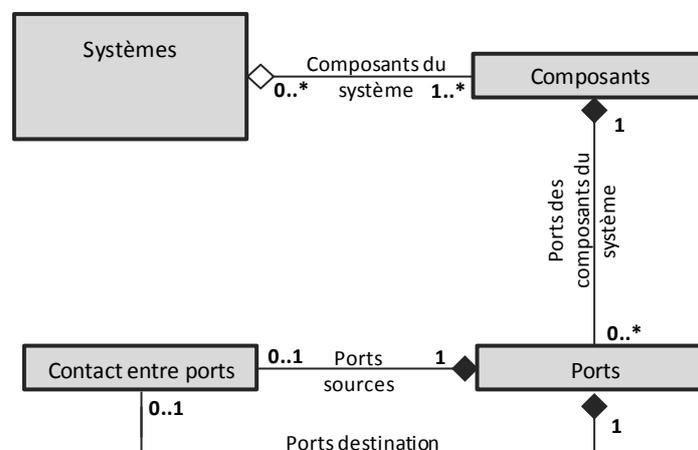


Figure 0-15. Modèle de classe simplifié orienté vue système

Dans le cadre d'une étude spécifique, cela peut impliquer la création de nouveaux modèles de composants ou la modification des modèles existants.

De la même façon que dans le cas des modèles composants, la création d'un modèle système est un processus décisionnel qui débute par le choix des limites du système étudié. Ainsi les mêmes règles de « découpage » que celles évoquées pour les composants peuvent être appliquées. De manière générale, on retiendra que les

modes de défaillances constatés dépendent de l'environnement d'un produit. Ainsi il peut être profitable de modéliser le produit dans son environnement en œuvre en incluant les composants voisins.

La Figure 0-16 représente le schéma de contact du modèle fonctionnel d'un capteur photovoltaïque réalisé d'après l'étude réalisée par (Hans, 2007b). La description de ce système est similaire à celle fournie dans l'étude initiale. La description complète du modèle est décrite au chapitre 0.

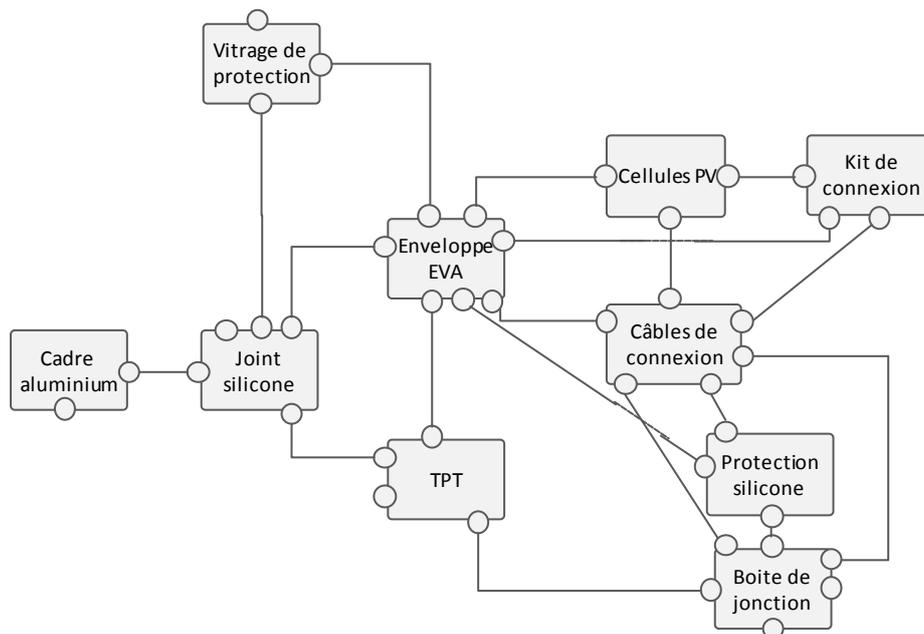


Figure 0-16. Représentation graphique du modèle d'un capteur PV d'après (Hans, 2007b)

B.3.2. Fonctionnement nominal d'un système

Les systèmes décrits sont considérés comme étant « à l'équilibre » et seules sont initialement étudiées les influences externes. Cela se traduit par une absence de flux sur les ports du système qui ne sont pas en contact avec des milieux.

La mise en relation d'un modèle de système avec un ou plusieurs milieux permet de mettre à jour son comportement vis-à-vis des flux qui décrivent le ou les milieux. Ce comportement est déduit de l'influence successive des différents composants sur les flux, tel que l'illustre la Figure 0-17.

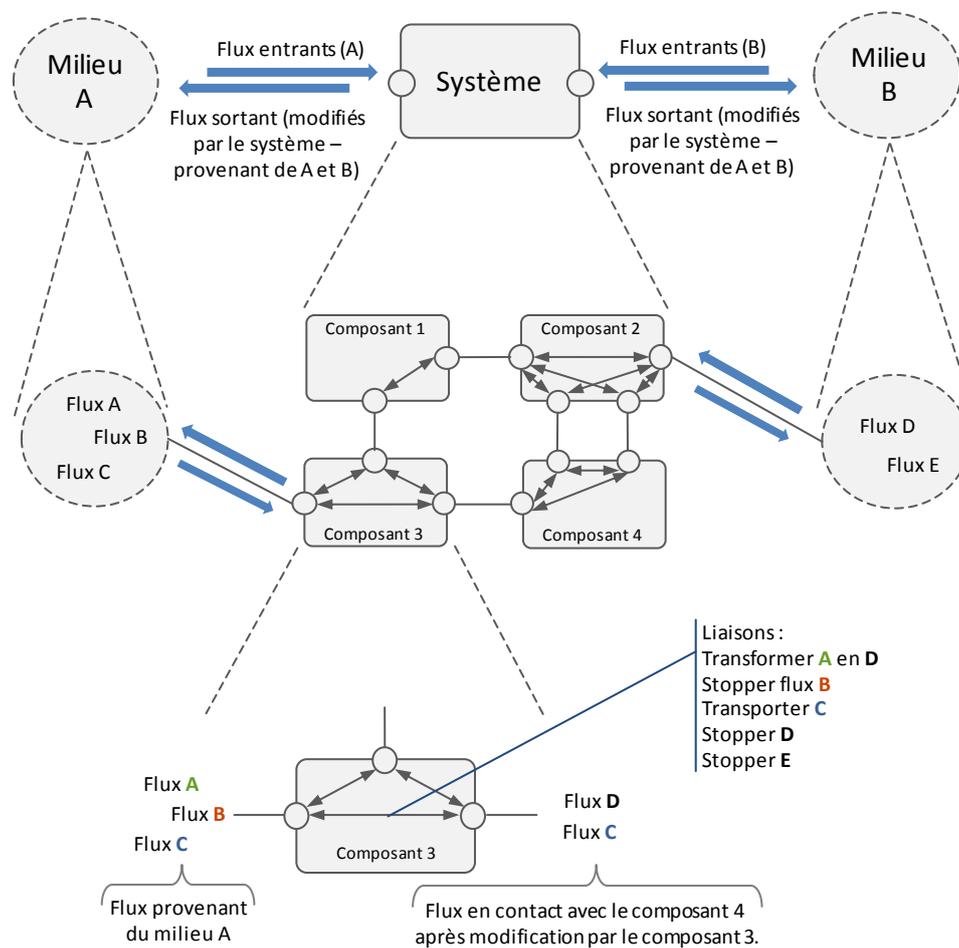


Figure 0-17. Propagation des flux à différentes échelles

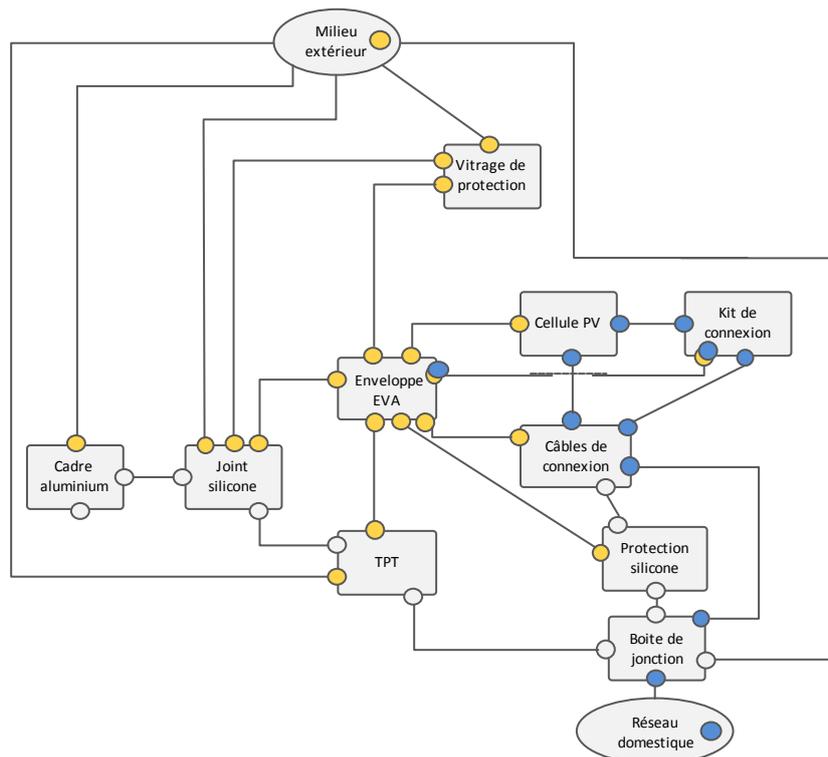
Le comportement d'un système vis-à-vis d'un flux donné est exprimé comme une succession d'opérations – transport, transformation, diminution, etc.- qui sont appliquées sur ce flux. Chaque opération est décrite par une des liaisons des composants par lesquelles le flux transite.

Il appartient au modélisateur de vérifier le comportement du système tel qu'il est décrit par l'étape de simulation fonctionnelle. Cette vérification peut être effectuée aux différentes échelles qui sont présentées à la Figure 0-17 :

- À l'échelle du système, en vérifiant la présence ou l'absence des flux d'un milieu à l'autre (p. ex. absence d'un flux d'eau dans un milieu décrivant l'intérieur d'une habitation) ;
- Au niveau des « chemins » empruntés par les flux, en parcourant l'ensemble des étapes qui affectent un flux donné (p. ex. dans le cas d'un capteur photovoltaïque, le flux de *rayonnement solaire* est *transporté* par des composants transparents, puis il est *transformé* en flux d'*énergie électrique* par les cellules, etc.) ;
- Finalement au niveau des modèles de composants, de leurs liaisons et des flux présents à leurs ports après simulation.

Cette étape de vérification du modèle fonctionnel du système fait intervenir plusieurs aspects, notamment un arbitrage effectué par le modélisateur, entre ses connaissances relatives au fonctionnement du système en question et le caractère restrictif du cadre de modélisation (p. ex. il n'est possible de représenter un système que dans un mode de fonctionnement donné). Nous appellerons *fonctionnement nominal* du système la représentation issue de ce compromis.

La Figure 0-18 reprend le modèle du capteur photovoltaïque développé en partie B.3.1 en y ajoutant deux milieux. Dans un souci de lisibilité, seul deux types de flux – *rayonnement solaire* et *énergie électrique* ont été représentés. Initialement, seul le *milieu extérieur* contient un flux (le flux de *rayonnement solaire*). Après propagation ce dernier se retrouve en contact avec plusieurs composants, dont le composant *cellule photovoltaïque* qui possède deux liaisons *transformer le rayonnement solaire en courant électrique*. Le flux de *courant électrique* est ensuite propagé par les composants conducteurs jusqu'au milieu *réseau électrique domestique*.



- Légende**
- Présence du flux « rayonnement solaire »
 - Présence du flux « courant électrique »
 - Présence des deux flux sur le même port

Figure 0-18. Représentation graphique des flux de rayonnement solaire et de courant électrique après propagation dans le modèle du capteur photovoltaïque.

Dans le cadre d'une étude plus complète, d'autres types de flux devraient être pris en compte. Ainsi le composant *vitrage de protection* du capteur PV est un composant étanche auquel la liaison *stopper les liquides* doit, entre autres, être attribuée.

Le marquage de certaines liaisons permet d'identifier les composants qui supportent la ou les fonctions principales du produit. Dans le cadre du capteur PV les liaisons marquées pourraient être :

- Transporter le rayonnement lumineux des composants *vitrage de protection* et *Enveloppe EVA* ;
- Transformer le rayonnement lumineux en courant électrique du composant *cellule PV* ;
- Transporter le courant électrique des composants *câbles de connexion*, *kit de connexion* et *boîte de jonction*.

Il nous apparaît utile ici d'insister sur les possibilités offertes par le cadre de modélisation pour représenter les fonctions.

Le fait d'exprimer les fonctions par rapport à un ensemble de flux génériques permet à nos yeux de décrire les fonctionnalités d'une vaste classe de systèmes. Il existe néanmoins quelques limitations quant à la manière dont les fonctions peuvent être prises en compte. Ainsi, il est connu que les représentations à base de composants ne sont pas vraiment adaptées à la représentation des systèmes présentant des parties mobiles (Forbus 2008). Pour prendre l'exemple trivial d'une fenêtre, le cadre de modélisation permet de la représenter ouverte ou fermée, mais le passage d'un état à un autre n'est pas représentable puisqu'il nécessite une modification des contacts entre composants. Cela implique qu'un seul état de fonctionnement est modélisable. Ce constat est bien entendu valable au niveau système comme au niveau composant.

B.3.3. Fonctionnement défaillant d'un système

On peut distinguer quatre classes de modes de dégradations, en fonction de leurs causes, qui peuvent être combinées :

- Dégradations causées par un ou plusieurs flux ;
- Dégradations causées par une erreur de processus ;
- Dégradations causées par une incompatibilité entre composants voisins ;
- Dégradations causées par une autre dégradation.

Ces concepts sont décrits plus en détail au chapitre B.2.6. Nous retiendrons ici que les effets sont exprimés soit en termes de modification d'une liaison du composant touché par la dégradation, soit directement en termes de nouvelles dégradations à appliquer au composant. Quand une dégradation est appliquée à un composant, la nouvelle liaison remplace donc une ou plusieurs des liaisons du composant. Les effets de la dégradation peuvent donc être répercutés au niveau du système en propageant les flux en fonction de la nouvelle liaison, les flux nouvellement propagés pouvant à leur tour déclencher de nouveaux modes de dégradations.

Lors de l'étude réalisée par (Hans, 2007b), différents modes de dégradations d'un capteur PV avaient été renseignés par les experts produits. Une de ces dégradations est décrite comme *fracturation du verre trempé suite à une averse de grêle* et elle entraîne la perte de la fonction *être étanche*. La traduction suivant le formalisme fonction/flux donne :

Fracturation du verre :

- cible = (matériau = verre) Et (Composant = Vitrage)
- cause = (type de flux = Énergie mécanique>Choc mécanique)
- effet = (transporter type de flux = matière).

La Figure 0-19 ci-dessous représente l'application des effets de cette dégradation sur le modèle de composant « vitrage de protection ». Ce dernier est représenté avec son environnement immédiat (les composants et milieux en contact direct) et possède initialement des liaisons *stopper la matière* entre chaque port, ce qui correspond à la généralisation de la fonction « être étanche » initialement décrite.

Une fois appliquées, les nouvelles liaisons remplacent les précédentes et modifient le modèle du composant.

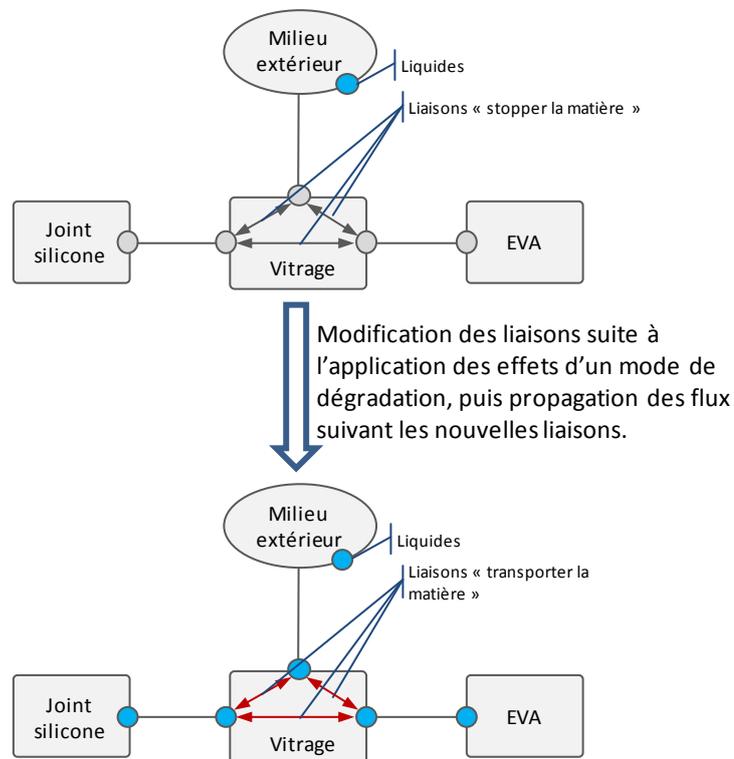


Figure 0-19. Effets d'un mode de dégradation « fissuration du vitrage ».

On remarque sur le schéma Figure 0-19 que toutes les liaisons du composant sont impactées, autrement dit, l'effet de la dégradation a été appliqué à chaque couple de ports du composant. Il n'est pas possible de déterminer *a priori* pour n'importe quel composant la façon dont les effets seront appliqués sans faire intervenir des connaissances supplémentaires : la nature précise du composant, sa géométrie, l'amplitude de la contrainte environnementale. Ces connaissances n'étant pas incluses dans le cadre de modélisation, il appartient au modélisateur de déterminer en détail l'application des effets pour chaque dégradation proposée. Dans le cadre du développement du prototype, nous avons choisi d'impacter l'ensemble des liaisons des composants. Cette solution est vue comme « le pire des cas », puisque c'est dans ce cas que le modèle a le plus de chance de s'écarter du fonctionnement nominal. Cet aspect sera abordé au chapitre B.4.

Le fait qu'un composant se voit appliquer un mode de dégradation n'implique pas nécessairement que le produit soit défaillant. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus la

fissuration du vitrage ne lui fait pas perdre son caractère transparent⁶ et le module continue à produire du courant électrique.

En revanche, toute modification affectant la production du capteur PV impacte directement ses fonctions, comme c'est le cas avec le mode de dégradation *fissuration des cellules PV*. Ce dernier est dû à la mise sous contraintes du module complet, pendant les phases de stockage ou de transport. Il conduit à la fissuration d'une partie des cellules du module, générant localement des ouvertures du circuit, et cela sans signe de dégradation visible (sauf inspection visuelle poussée). Consécutivement, la production du module en service baisse. La traduction suivant le formalisme fonction/flux donne :

Fissuration des cellules :

- /cible = (composant : Cellule PV) ;
- /cause = (Processus : charge pendant le transport ou le stockage) ;
- /effet = (Transformer totalement - Limiter flux transformé type de flux : matière).

Les effets de l'application de ce mode de dégradation sont représentés Figure 0-20.

⁶ Les experts produits considéraient qu'une fragmentation du verre pouvait conduire à une légère perte de transmission optique par diffraction sur les champs de rupture, et donc à une baisse de productivité du module.

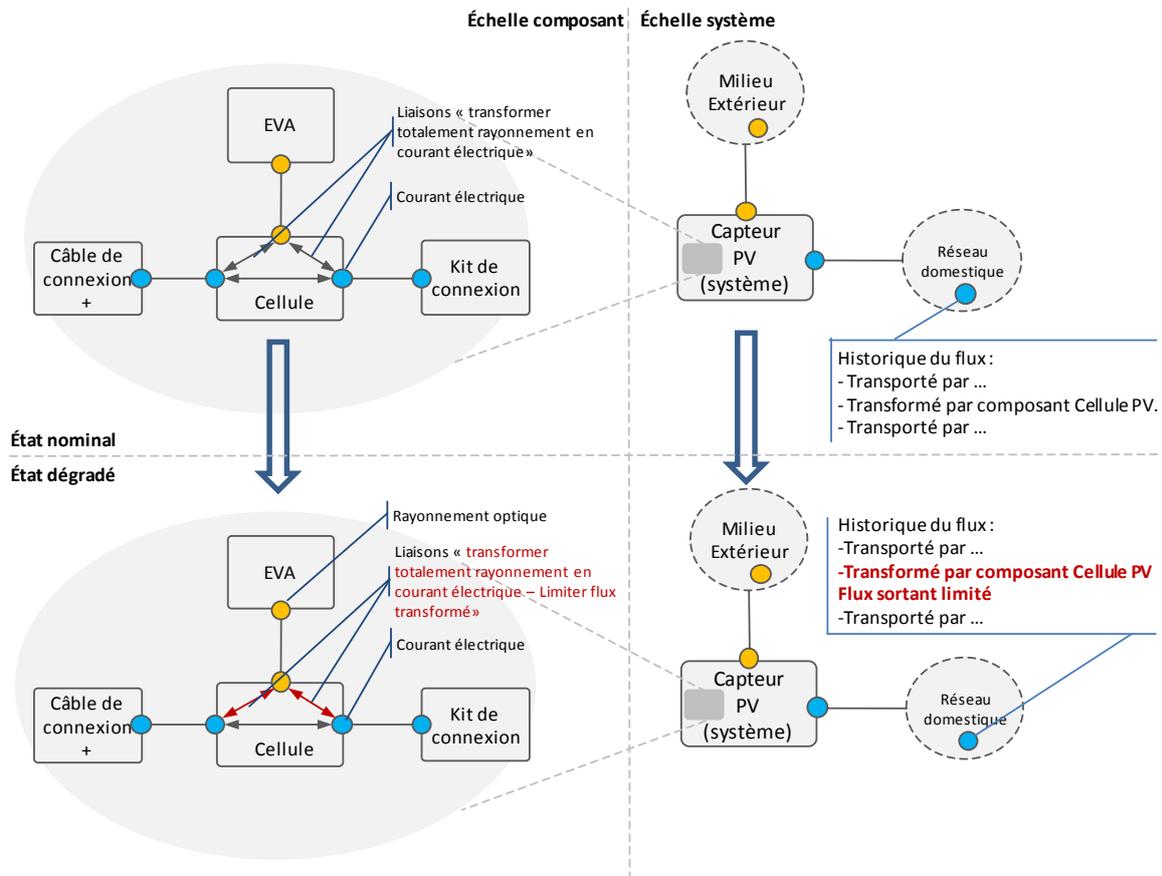


Figure 0-20. Effet d'un mode de dégradation à l'échelle composant (partie gauche) et à l'échelle système (partie droite)

Dans cet exemple l'application du mode de dégradation au modèle du composant entraîne directement une modification des flux sortants, qui est détectable *via* l'historique du flux *courant électrique*. La production du module n'étant pas nulle, on parlera alors de défaillance partielle.

B.3.4. Construction d'un graphe d'état

Nous avons préalablement introduit la notion de graphe d'état et l'avons distinguée de celle de graphe événementiel de défaillance (GED). Nous reprenons ici ces définitions :

- Un GED est une représentation condensée et synthétique des défaillances impactant le système. Les nœuds du graphe représentent des phénomènes de dégradation. Les arcs décrivent les causes des dégradations.
- Un graphe d'état est une représentation exhaustive, décrite en fonction du cadre de modélisation que nous avons défini et produite par un outil

informatique : à chaque nœud du graphe correspond une description complète d'un système et à chaque arc un phénomène de dégradation.

Les mêmes enchaînements d'événements peuvent être décrits avec l'un ou l'autre de ces formalismes. Cependant, une des limitations de l'AMDEC « traditionnelle » réside dans la difficulté à traiter les combinaisons de défaillances de manière systématique (Price, 2002). Or, la mise à jour d'un mode de dégradation peut dépendre de la prise en compte préalable d'un ou plusieurs autres modes. La manière dont un outil informatique construit le graphe d'état est donc un facteur clef à prendre en compte.

Lors du développement du prototype, qui sera abordé au chapitre B.4, nous avons choisi de considérer de manière systématique les combinaisons de défaillances, ce que nous justifions par la nécessité de mettre à jour l'ensemble des modes de dégradations : la présence simultanée de deux modes de dégradation peut être nécessaire pour en déclencher une troisième. Ainsi, dans le cadre d'une approche automatisée, seuls des graphes d'état exhaustifs permettent la mise à jour de toutes les dégradations applicables au système étudié.

Ces notions sont illustrées Figure 0-21. Dans cet exemple, l'application des effets des modes de dégradation D1 et D3 est nécessaire pour mettre à jour le mode D5. Cela se traduit facilement de manière graphique sur le GED. En revanche, la mise à jour de D5 par le biais d'un graphe d'état implique deux modifications du modèle du système consécutives : une suite aux effets de D1, et une seconde suite aux effets de D2.

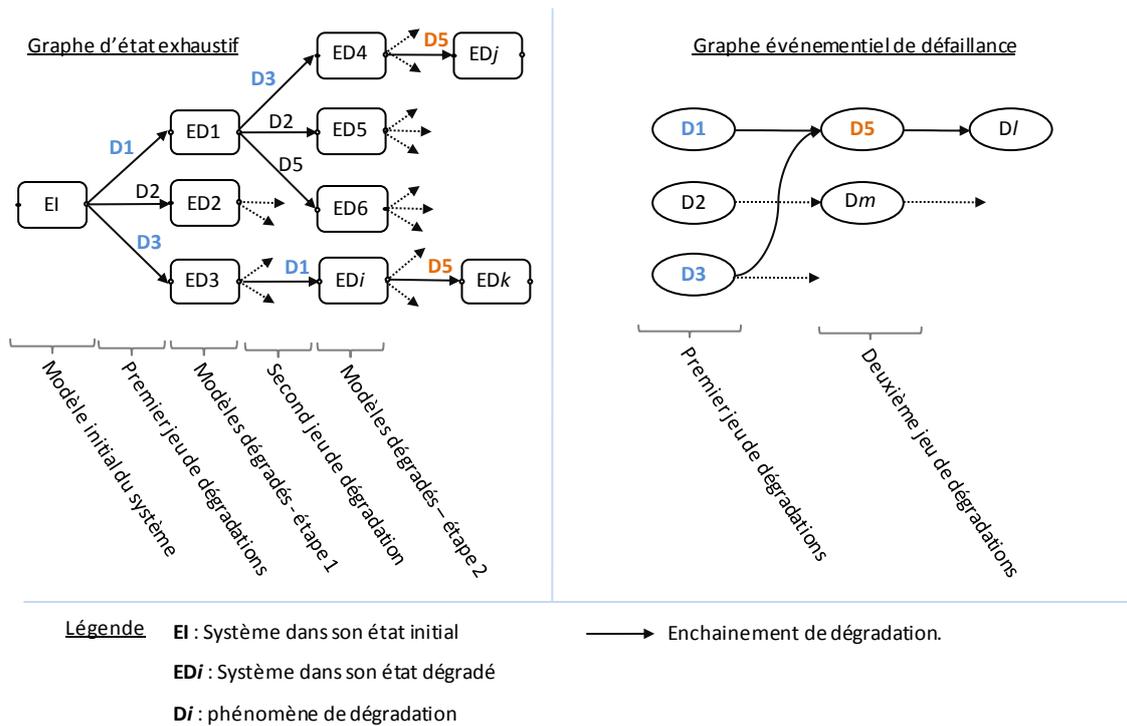


Figure 0-21. Comparaison entre graphes d'états et graphes événementiels de défaillance

Nous notons également que la construction des graphes exhaustifs n'est pas envisageable de manière manuelle, sauf dans les cas les plus simples (très faible nombre de composants et de dégradations). En effet, le nombre de combinaison croît, au minimum, de manière factorielle avec le nombre de dégradations initiales. Ainsi, un système pour lequel 15 dégradations sont mises à jour à la première itération possède *a minima* $1,3 \cdot 10^{12}$ scénarii de dégradations possibles. Par ailleurs, certains enchaînements de dégradations décrits dans le graphe d'état n'auront nécessairement pas de signification particulière : leur combinaison ne conduit pas à mettre à jour un nouveau mode de défaillance. Une étape de « post-traitement » des graphes d'états sera certainement nécessaire pour éliminer ces types d'enchaînements. La construction d'un graphe se déroule donc en plusieurs étapes, qui sont décrites par la Figure 0-1 et que nous reprenons de façon plus détaillée ici :

- Propagation des flux au sein du système : les flux présents dans les milieux sont propagés dans le système ;
- Mise à jour des premières dégradations : réalisée en fonction des relations causes-cibles qui définissent les dégradations décrites dans les bases.

- Application des effets : modification des liaisons ou application directe des dégradations décrites comme effets ;
- Itérations : nouvelles propagations des flux et nouvelles recherches de dégradations ;
- Conditions d'arrêts pour une branche donnée : la construction du graphe peut s'arrêter quand plus aucune dégradation ne peut être découverte, ou quand une liaison marquée est modifiée.

Lors de la construction des scénarii de défaillance dans le cadre d'une approche classique, par exemple (Hans, 2007b), la pertinence des dégradations évoquées est l'objet de discussion, négociation et mise en perspective effectuées par les experts produits et méthodes. Nous ne parlons pas ici de l'évaluation de la criticité, qui intervient a posteriori, mais bien du choix des modes de défaillances à prendre en compte dans l'étude. Le graphe événementiel de défaillance est donc le résultat d'un processus décisionnel effectué dans le cadre d'une dynamique de groupe. La situation est différente pour le type d'usage qui avait été envisagé en amont du développement de CPAO : l'utilisateur du logiciel est a priori seul à prendre les décisions. La prise de décision dépendra, selon nous, de divers paramètres, notamment :

- Les connaissances de l'utilisateur relatives aux systèmes, ses modes de fonctionnements, les mécanismes de dégradation, etc. Les divers aspects du modèle, créé par l'utilisateur, notamment son caractère fonctionnel, atemporel, etc. ;
- La compréhension des possibilités et limitations du cadre de modélisation et de l'outil ;
- La façon dont les connaissances décrites sont restituées.

Cet aspect constitue un champ d'exploration important que nous n'aborderons pas. Nous évoquerons néanmoins les modes de construction des graphes d'états que nous envisageons :

- Une construction pas-à-pas : l'outil soumet des informations (propagation des flux et modes de défaillances) à l'utilisateur qui les évalue et décide ou non de les prendre en compte, éventuellement après modification ;

Partie B. Développement d'un cadre de modélisation

- Une construction automatisée, basée uniquement sur le modèle du système défini par l'utilisateur et les descriptions des modes de dégradations disponibles dans les bases.

Pour des raisons essentiellement pratiques, seule la seconde approche a été implémentée dans le prototype d'outil développé qui sera décrit au chapitre suivant.

B.4. Développement d'un prototype d'outil

Le génie logiciel propose de nombreux outils et méthodes concourant à la production d'un logiciel, au-delà de la seule activité de programmation. En ce qui nous concerne, l'enjeu est, dans un premier temps, de tester et d'évaluer les différentes fonctionnalités offertes par le cadre de modélisation que nous avons défini. Nous n'adoptons donc pas un processus de développement centré sur l'utilisateur, mais cherchons à développer un prototype fonctionnel. Ce dernier vise à permettre d'évaluer en pratique les différents concepts que nous avons développés. Il doit ainsi supporter la conduite des études sous ses différents aspects.

Le développement du prototype, dont une capture d'écran est présentée Figure 0-22, a été réalisé sous TEEEXMA en partenariat avec son éditeur, la société Bassetti. TEEEXMA est un outil paramétrable dédié à la capitalisation des données techniques. Il est composé d'une interface graphique, d'une interface de programmation, de bases de données interfacées sous différents formats ainsi que de divers modules. Il possède nativement de nombreuses fonctionnalités qui auraient nécessité un développement spécifique sous CPAO, notamment :

- Une interface graphique fonctionnelle permettant la consultation et la modification des données ;
- Une gestion avancée des droits utilisateurs ;
- Un déploiement web et réseau permettant de travailler de manière collaborative.

Plusieurs fonctionnalités complémentaires sont également disponibles : recherche simple et multicritère, assistant d'importation et d'exportation de documents et données sous différents formats, navigation par liens, etc. Le développement du prototype basé sur TEEEXMA a été réalisé en deux étapes :

- La construction d'une *structure de données* ;
- Le développement d'un *module de calcul* spécifique.

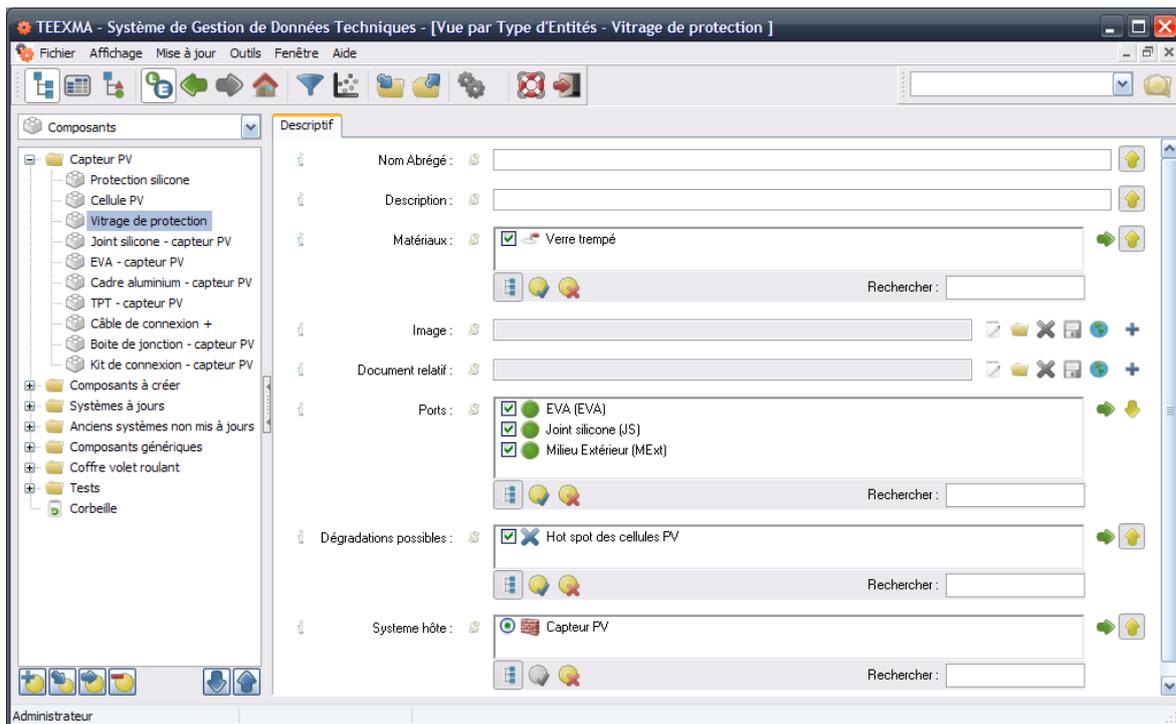


Figure 0-22. Capture d'écran du prototype

La structure de donnée a été constituée en traduisant les divers éléments du cadre de modélisation en modèles de classes en suivant une notation UML. Elle a ensuite été implémentée directement dans TEEXMA. Le module de calcul a été développé à partir de nos spécifications. Il gère les différentes étapes automatisées de l'étude :

- Propagation des flux ;
- Recherche des modes de dégradations
- Application des effets,
- Itérations ainsi que la présentation des résultats.

Nous avons ensuite testé les différentes fonctionnalités du prototype. La partie développement ayant été externalisée elle ne sera pas décrite ici dans le détail. Nous détaillerons cependant certains points clefs ci-après, notamment les principales fonctionnalités de l'outil.

B.4.1. Fonctionnalités du prototype

B.4.1.1. Conduite d'une étude

La réalisation de l'étude d'un produit nécessite plusieurs étapes que l'on peut classer en trois catégories :

- Description du système ;
- Propagation des flux et mise à jour des modes de dégradations ;
- Vérification des résultats par l'utilisateur.

L'ensemble de ces étapes sont réalisables grâce à l'outil. La Figure 0-23 les décrit en distinguant celles qui doivent être effectuées par l'utilisateur au travers d'une interface et celles qui sont prises en charge directement par l'outil.

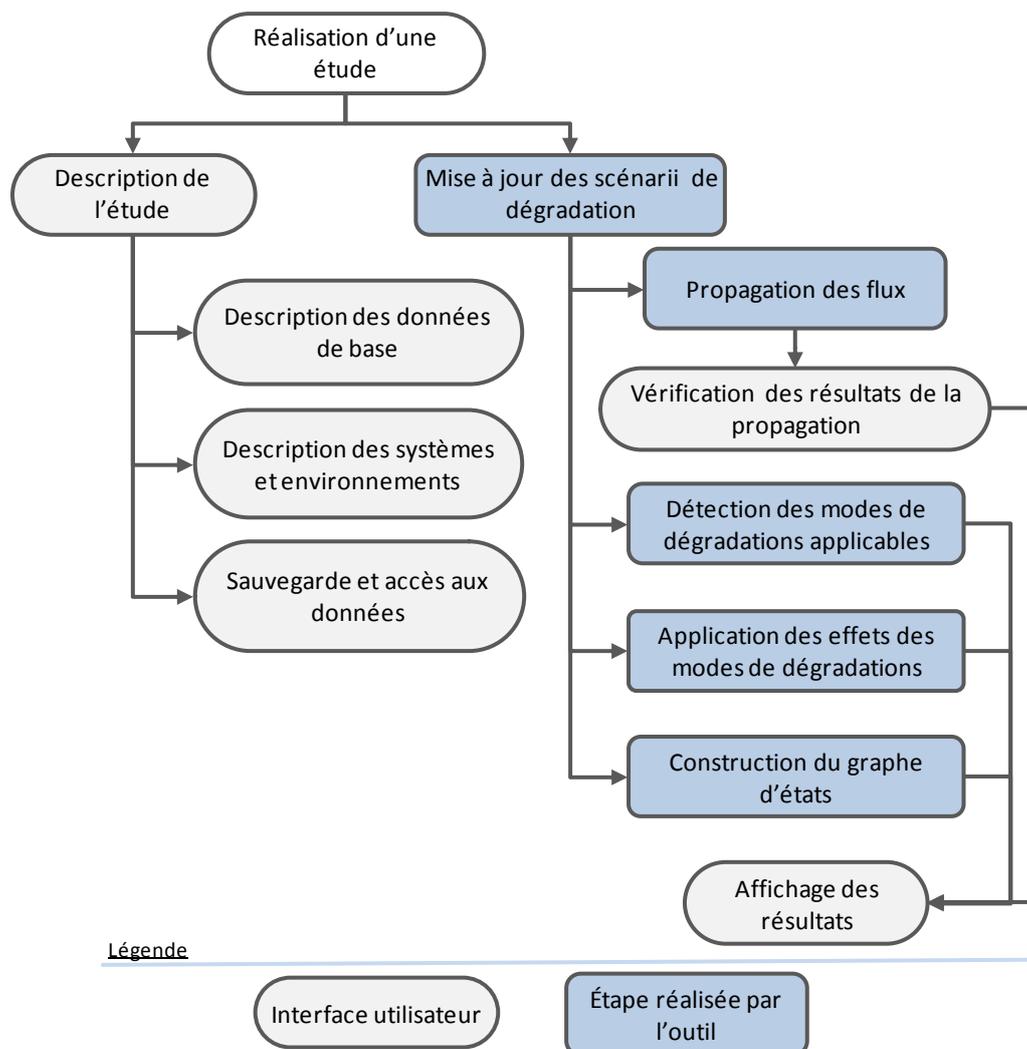


Figure 0-23. Principales fonctionnalités du prototype

Les différentes interfaces permettent de renseigner les données de base qui servent à la description des systèmes : types de matériaux, types de composants, dégradations, flux, etc. À chaque type de données sont associés plusieurs champs permettant une description textuelle ou un lien vers un document annexe, comme l'illustre la Figure 0-22 qui présente l'interface de création d'un composant.

Les données implémentées par l'utilisateur ou déjà disponibles sont ensuite utilisables pour décrire un système. Cette étape est réalisée en créant des liens

entre les données existantes, par exemple en précisant qu'un port appartient à un composant donné ou qu'un composant fait parti d'un système. Ces liens sont ceux définis par la *structure de données*, elle-même construite à partir des modèles UML que nous avons développés.

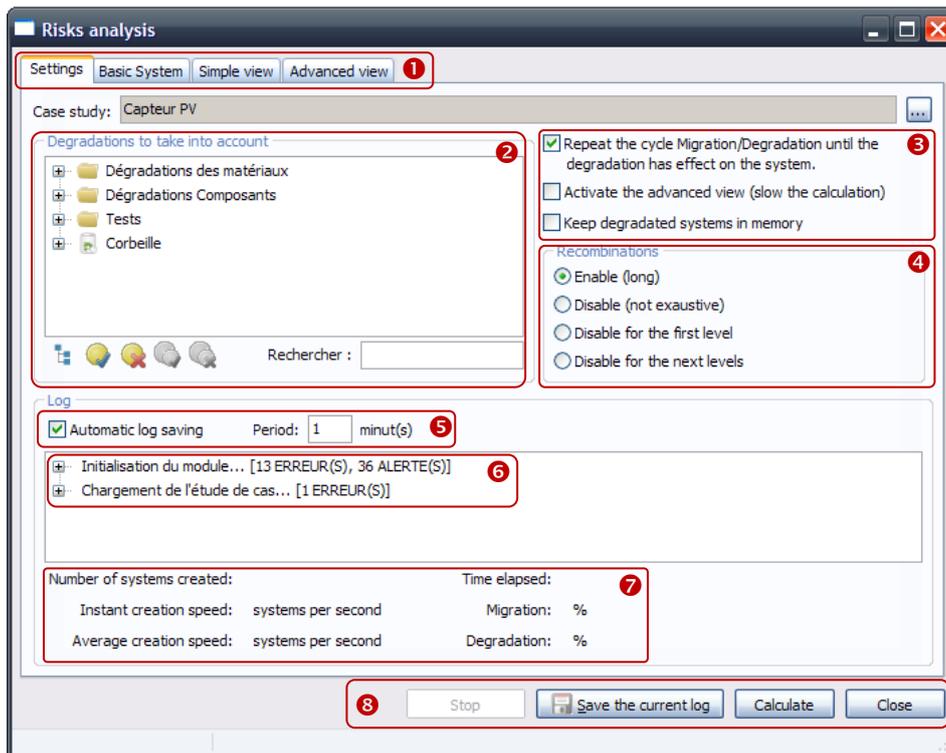
Une fois la modélisation du système terminée, l'outil donne accès à une interface permettant de réaliser la suite de l'étude via le module de calcul. Cette interface, dont une capture d'écran commentée est présentée figure 0-24, présente quatre onglets différents (partie ① figure 0-24). L'onglet « settings » permet de paramétrer et de lancer les calculs. L'onglet « basic system » affiche les informations relatives au système après la première propagation des flux, mais avant prise en compte des modes de dégradations. Les onglets « simple view » et « advanced view » présentent l'état des systèmes après prise en compte des défaillances, respectivement en présentant uniquement les enchaînements de défaillances ou le détail des états des systèmes.

Différentes options permettant de contrôler le déroulement de l'étude ont été implémentées. Ainsi, il est possible de sélectionner les modes de dégradations à prendre en compte (partie ②) parmi ceux présents dans la base.

Les commandes présentes dans la partie ③ permettent de sélectionner différentes options. La première et la dernière sont des options de test, l'option « advanced view » influence la manière dont les résultats sont présentés. Le mode de construction de l'arbre d'état peut être modifié en prenant en compte ou non les combinaisons de dégradations (respectivement options « Enable » et « disable (not exhaustive) » de la partie ④). Les deux autres modes présentés ne sont pas opérationnels.

Les résultats sont sauvegardés sous forme de fichiers textes, la fréquence de sauvegarde est modifiable (partie ⑤).

La liste des erreurs et alertes mises à jour lors du chargement du module est présentée au chargement de l'étude (partie ⑥) : l'outil dresse une liste des liaisons non rattachées à des ports et des fonctions sans flux d'entrée ou de sortie. Il précise également les dégradations dont les effets, les causes ou les cibles ne sont pas définis.



Légende

- | | |
|--|---|
| ① Onglets du module | ⑤ Option de sauvegarde des résultats |
| ② Choix des dégradations à prendre en compte | ⑥ Erreurs détectées |
| ③ Options de calculs | ⑦ Nombre de systèmes créés et avancement de l'étude |
| ④ Mode de construction des arbres d'états | ⑧ Contrôles |

Figure 0-24. Capture d'écran commentée du module de calcul

Il est à noter qu'en l'état actuel du développement, le prototype ne permet pas de construire des graphes d'états complets. Une limitation technique empêche la construction complète de l'arbre d'état. Celle-ci est généralement arrêtée après la découverte et la prise en compte d'une dizaine de dégradations. Il est évident que ce problème limite considérablement l'analyse.

Dans le cadre d'une construction des graphes d'états complètement automatisée, la question de l'application des effets est critique : pour conserver des modèles de composant simulable il faut, en fonction des cas, ajouter une nouvelle liaison ou remplacer une liaison existante. Dans le cas contraire, le risque est d'obtenir, pour un même couple de ports, plusieurs liaisons applicables à un même type de flux. Les effets des dégradations sont donc appliqués sur certaines des liaisons d'un composant cible en fonction de règles *ad hoc* qui ont été préalablement définies. Pour déterminer si une liaison existante doit être modifiée ces règles tiennent

compte des relations de parentés entre les flux de la liaison initiale et de la liaison effets. Dans les cas où l'effet ne peut être pris en compte en modifiant une liaison existante, une nouvelle liaison est alors créée. La façon dont sont traités les différents cas est illustrée par la Figure 0-25.

```
Si effet dégradation = stopper flux A
  Alors
    [règle 1 :]
    Si liaison initiale = transformer totalement flux B en flux C
      Alors
        si A parent de C faire:
          Remplacer la liaison par l'effet de la dégradation
          marquer l'effet comme pris en compte pour cette liaison
          passer à la liaison suivante
        Fin si

        [S'il n'existe aucun lien de parenté entre B et A alors le
         remplacement de la liaison n'a aucun sens]

    [règle 2 :]
    Sinon, si liaison initiale = stopper flux B
      Alors
        si B parent de A faire:
          Remplacer la liaison par l'effet de la dégradation
          Marquer l'effet comme pris en compte pour cette liaison
          Passer à la liaison suivante
        Fin si

    [règle 3 à n : suite d'instruction pour chacun des types de
     fonction initiale possible]

    Sinon, faire:
      Créer liaison stopper flux A [si aucune liaison n'a pu
       être remplacée une nouvelle liaison stopper A est créée]
      Marquer l'effet comme pris en compte pour cette liaison
      Passer à la liaison suivante [nouvelle recherche
       d'application des effets sur les autres liaisons du
       composant]

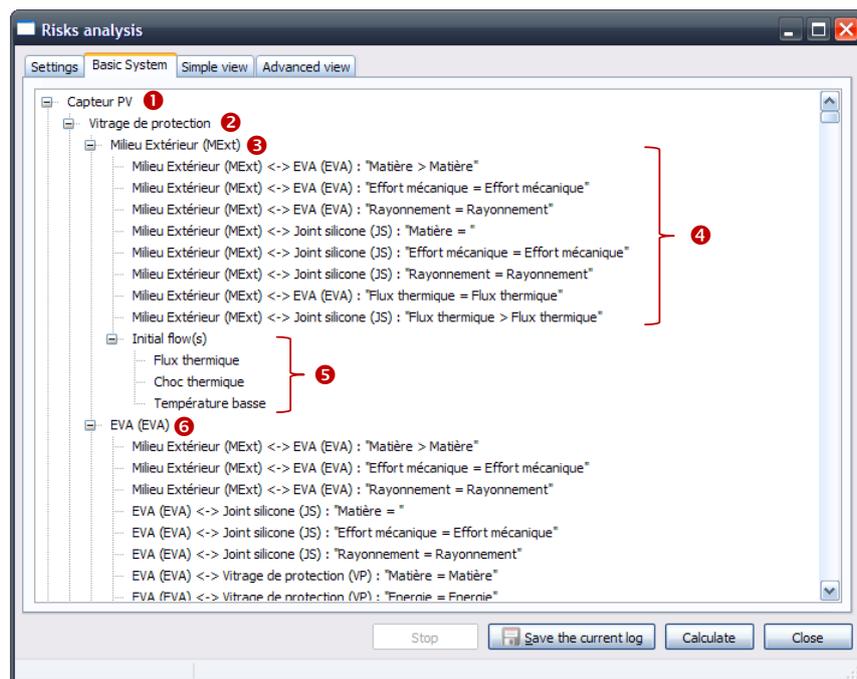
[suite d'instructions pour chacun des types d'effets possibles du type
'si effet dégradation = 'fonction' flux A]
```

Figure 0-25. Extrait de l'algorithme d'application des effets montrant une partie des règles mises en place pour l'application des effets de type 'stopper'.

Il a également été décidé d'appliquer les effets sur l'ensemble des couples de ports des composants dégradés et pas uniquement sur les liaisons partant du port où les conditions d'activation de la liaison sont présentes (cf. chap. B.3.3).

B.4.1.2. Présentation des résultats

Le premier onglet présente les résultats de la première propagation des flux (figure 0-26), ce qui permet de vérifier le comportement du modèle avant prise en compte des modes de dégradations. Il présente, pour chaque port de chaque composant, d'une part les liaisons reliées à ce port, d'autre part les flux présents. Pour ces derniers une distinction est effectuée entre les flux initialement présents – c'est-à-dire placés par l'utilisateur lors de la description du système – et ceux qui apparaissent après propagation.



- Légende**
- | | | | |
|---|---------------------------|---|---------------------------|
| 1 | Système | 4 | Liaisons du port |
| 2 | Composant | 5 | Flux présents sur le port |
| 3 | Premier port du composant | 6 | Second port du composant |

0-26. Capture d'écran présentant le résultat de la première propagation des flux

Les deux options de visualisation des résultats de la recherche de dégradation – la vue simplifiée et la vue complète sont présentées Figure 0-27, respectivement. Il a été choisi de proposer deux modes d'affichage des résultats, d'une part pour rendre les calculs plus rapides : seul le nom des dégradations est conservé en mémoire dans la vue simplifiée.

Partie B. Développement d'un cadre de modélisation

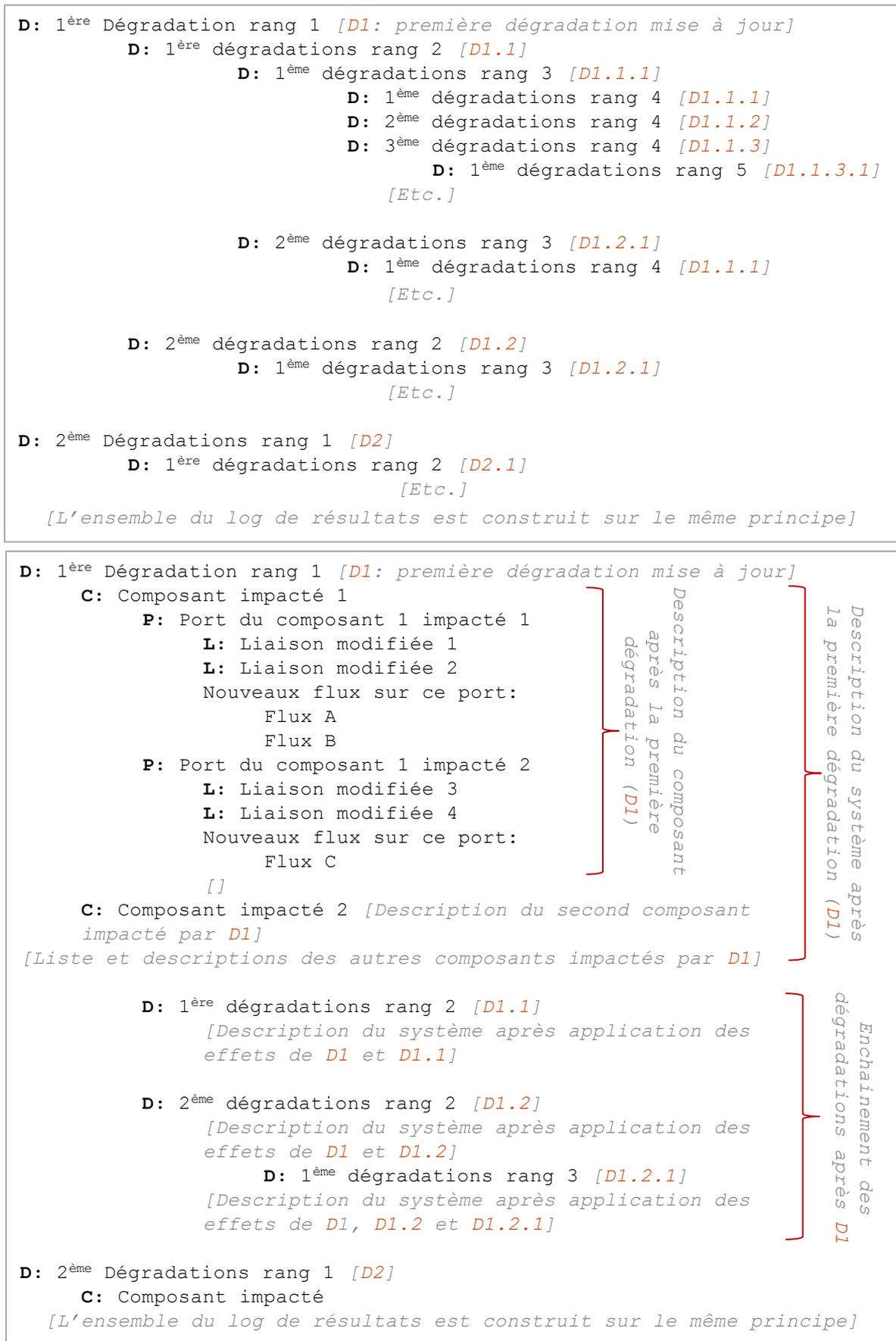


Figure 0-27. Structure des logs de résultats simplifiés (haut) et exhaustifs (bas)

B.4.1.1. Perspectives d'évolution de l'outil

Il existe un certain nombre de différences entre les fonctionnalités du prototype développé et celles initialement attendues. D'une part les contraintes du développement ont conduit à limiter le nombre de fonctionnalités, notamment la possibilité de réaliser des études pas à pas, d'autre part cette étape a été l'occasion de préciser certains concepts. Nous aborderons ici les principales distinctions entre le prototype et le cadre de modélisation.

Le marquage fonctionnel n'a pas été complètement implémenté : il est actuellement considéré comme un attribut de type booléen affecté à l'objet *liaison*. Quand cet attribut est vrai, la liaison est considérée comme marquée, mais il n'est pas possible de documenter ce choix. Néanmoins la présence ou l'absence d'un marqueur est testée par l'algorithme et est considérée comme une condition d'arrêt à la construction des arbres d'états.

Le prototype ne propose pas d'étude pas-à-pas. À partir de la description des données incluses dans les bases et de la description d'un système, le module de calcul permet une construction automatisée des arbres d'états, mais l'utilisateur n'a pas la possibilité d'intervenir au cours de la construction de l'arbre. L'implémentation de cette fonctionnalité s'est révélée trop coûteuse en termes de développement (elle impliquait notamment la création de plusieurs interfaces). Ainsi la possibilité de modifier une dégradation qui serait présentée par le logiciel n'est possible qu'*a posteriori*.

Par ailleurs, aucune représentation explicite des milieux n'a été développée : une étude est réalisée en attribuant directement des flux aux ports qui devraient être en contact avec les milieux.

B.4.2. Construction d'une arborescence de flux

L'utilisation de l'outil implique de constituer une arborescence de flux adaptée à la problématique. Nous nous sommes pour cela basé sur les travaux de Stone et coll. (Stone, 2000) qui ont été évoqués au chapitre A.2.2.3. Ils adoptent l'approche « classique » du domaine de la conception fonctionnelle. Les comportements des systèmes sont exprimés en termes d'actions sur des flux qui sont organisés de manière hiérarchique et subdivisés en trois catégories principales : matériaux, énergie et signal.

Class (Primary)	Secondary	Tertiary
Material	Human	
	Gas	
	Liquid	
	Solid	Object
		Particulate
		Composite
	Plasma	
	Mixture	Gas-Gas
		Liquid-Liquid
		Solid-Solid
		Solid-Liquid
		Liquid-Gas
		Solid-Gas
	Solid-Liquid-Gas	
	Colloidal	
Signal	Status	Auditory
		Olfactory
		Tactile
		Taste
		Visual
	Control	Analog
		Discrete
Energy	Human	
	Acoustic	
	Biological	
	Chemical	
	Electrical	
	Electromagnetic	Optical
		Solar
	Hydraulic	
	Magnetic	
	Mechanical	Rotational
		Translational
	Pneumatic	
	Radioactive/Nuclear	
Thermal		

Figure 0-28. Hiérarchie des flux selon (Stone, 2000)

Dans un premier temps, nous avons sélectionné les principaux types de flux issus de ces travaux en fonction de leur pertinence vis-à-vis du domaine à modéliser. Ainsi certains types de flux ont été écartés *a priori*, car ils ne semblaient pas nécessaires pour rendre compte du comportement des produits de construction.

C'est le cas par exemple du type de flux de matière *plasma* qui est un état de la matière qu'on ne rencontre pas dans des conditions normales de température et de pression.

Il nous faut également pouvoir mettre à jour les modes de dégradations dont une grande partie est due aux interactions avec les environnements auxquels les systèmes sont confrontés. Ainsi, dans un second temps, la liste des agents environnementaux disponibles dans CPAO a été « raccordée » à l'arborescence de flux. Pour ce faire, chaque agent environnemental a été attribué à un ou plusieurs types de flux.

Ces deux points sont abordés plus en détail ci-après.

B.4.2.1.1. Choix des principaux flux

Certains types de flux ont été écartés pour différentes raisons (d'autres ont été retirés à l'usage) qui sont principalement :

- Il ne nous paraissait pas nécessaire de les prendre en compte dans le cadre de la physique du bâtiment ;
- Nous avons jugé qu'il était possible de les prendre en compte différemment. Ainsi le flux *mélange gaz-gaz* provenant du Functional basis peut être représenté par deux flux de type *gaz* distincts.

Les principales modifications sont listées ci-dessous :

- Suppression du type de flux *signal* et de ses sous types ;
- Suppression des types de flux de matière et d'énergie liés aux interactions humaines ;
- Pour les flux de matière : suppression des flux *composite, plasma, mélange* et de leurs sous types ;
- Uniquement pour les flux de type énergie :
 - o Pour les types d'énergie : suppression de la distinction entre les composantes flux et efforts ;
 - o Suppression du type de flux énergie biologique, énergie chimique, pneumatique, nucléaire ;
 - o Fusion des types de flux énergie de translation et énergie de rotation comme sous type d'énergie mécanique ;

- Fusion du type énergie solaire comme sous type d'énergie de rayonnement.

Remarque : La suppression d'une classe de flux – par exemple *énergie biologique* - ne signifie pas que les phénomènes liés à ce type d'énergie ne seront pas pris en compte, mais simplement qu'ils ne participent pas à l'expression des fonctions des systèmes. Ils peuvent être pris en compte indirectement *via* les modes de défaillances.

B.4.2.1.2. Ajout des agents environnementaux à la nouvelle arborescence de flux

Lors d'une seconde étape, nous avons fait correspondre les agents environnementaux issus de la liste de CPAO aux principaux types de flux. Bien qu'il s'agisse uniquement d'apparenter un agent environnemental à un type de flux selon sa nature, l'exercice a révélé certaines limitations. Certains agents environnementaux contenus dans la base ne pouvant simplement pas être apparentés à un flux.

Deux cas se sont présentés :

- Les agents environnementaux qui sont clairement une composante de l'environnement d'usage du système, mais qui ne peuvent pas être décrits directement par un flux. Ainsi l'agent environnemental *grêle* ainsi que tous les types de *précipitations* ne peuvent être insérés directement dans la classification ;
- Les agents environnementaux, qui comme les premiers ne peuvent être apparentés à des flux, mais qui en plus en caractérisent d'autres, comme par exemple *agent acide*.

Comme évoquée plus haut, la classification des flux doit permettre de répondre à deux problématiques :

- Permettre de représenter les comportements (les sous types de flux obéissent aux mêmes règles que les flux) ;
- Permettre de mettre à jour les modes de dégradations des composants.

Vis-à-vis de ces objectifs, il apparaît qu'une organisation hiérarchique des flux n'est pas systématiquement suffisante. En effet, il n'est pas possible d'obtenir une structure de données cohérente basée sur une taxonomie avec deux axes de classifications (parenté avec un type de flux et cause de dégradation).

La solution choisie consiste à conserver la structure de la taxonomie de base et à ajouter, en plus de la relation de parenté qui sous-tend la taxonomie, une relation complémentaire que nous avons appelée *relation de similitude*. La première relation vise à permettre de classer les flux vis-à-vis de leur comportement, la seconde permet de préciser que les deux ou plusieurs flux sont susceptibles de provoquer les mêmes dégradations. Ces relations sont illustrées par un modèle de classe présenté Figure 0-29 *b)* et un exemple Figure 0-29 *c)*.

Il est également apparu nécessaire d'ajouter une classe supplémentaire à la racine de l'arborescence. Cette classe, nommée *pseudo flux* contient les types d'agents environnementaux qui ne peuvent être assimilés à des flux. Chacun de ces *pseudo flux* est par la suite relié à un ou plusieurs flux existant dans le reste de la classification par la relation de similitude.

Cela nous permettrait de décrire une dégradation comme étant causée par un pseudo flux et de la déclencher lorsque n'importe lequel des flux rattachés est présent dans un système. Ainsi le flux *eau de javel* est lié aux pseudo-flux *agents basiques* et *agents oxydants*. Néanmoins, la mise à jour de modes de dégradation par l'intermédiaire de ce type de flux n'est pas encore implémentée dans l'outil. La taxonomie résultante est présentée Figure 0-29 *a)*.

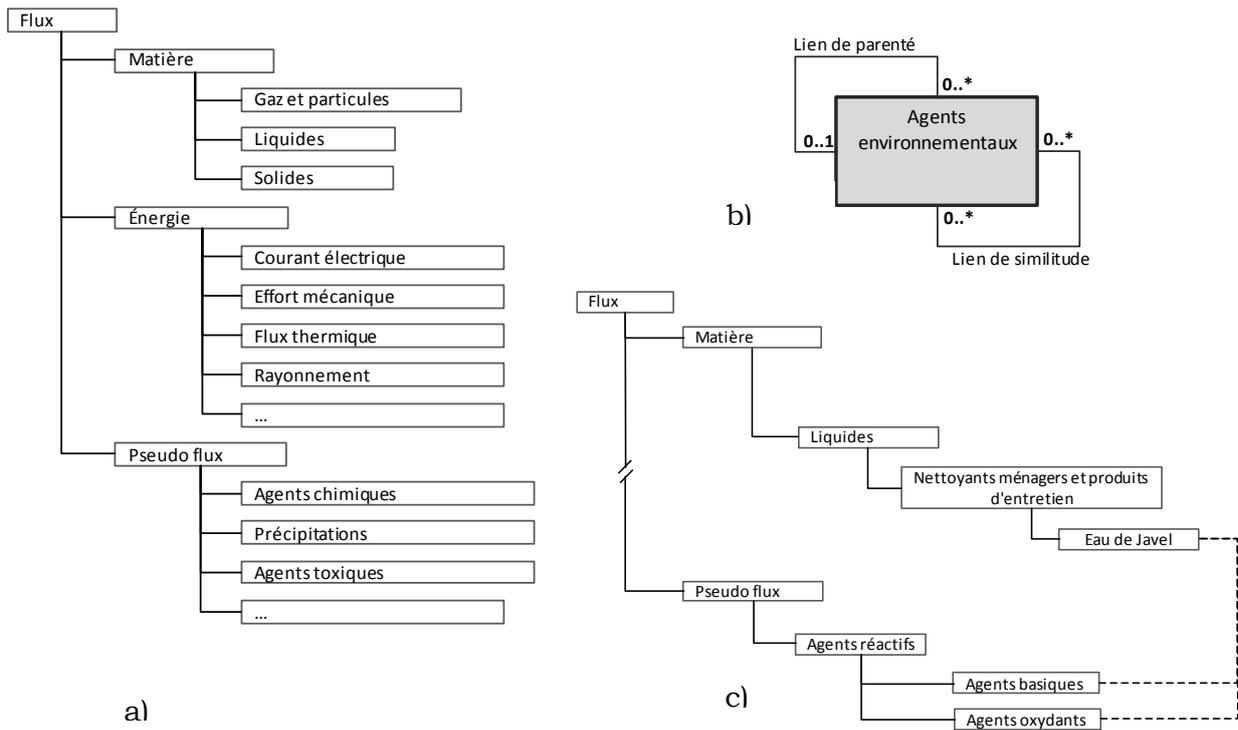


Figure 0-29. **a)** Extrait de la typologie des flux. **b)** Modèle de classe simplifié. **c)** Illustration des relations entre flux.

L'arborescence des flux complète comprend environ cent quatre vingt items. Elle est présentée en annexe 4.

Partie C .

Mise en application du cadre de
modélisation

C.1. Évaluation du cadre de modélisation

L'objet de nos travaux vise, *in fine*, à permettre le développement d'un outil logiciel permettant d'atteindre les différents objectifs qui ont été posés et que nous rappelons ici :

- Faciliter la conduite d'une étude, notamment en permettant à un agent de réaliser l'étude en autonomie ;
- Diminuer le temps nécessaire à l'obtention des résultats, notamment en automatisant certaines étapes ;
- Permettre le partage des connaissances relatives au produit et à leurs modes de défaillances ;
- Être applicable à l'ensemble des familles de produits du bâtiment.

Les différents éléments du cadre de modélisation que nous avons développés, ainsi que leurs conditions d'utilisation que nous avons définies et implémentées au sein d'un prototype d'outil constituent un ensemble qu'il est nécessaire d'évaluer au regard de ces objectifs. L'enjeu de ce chapitre est donc de cerner plus finement les possibilités et limites de nos travaux. Nous avons pour cela développé plusieurs cas d'étude destinés à évaluer différents aspects du cadre de modélisation d'un point de vue théorique ainsi que de manière globale et en pratique à l'aide du prototype.

La première étude réalisée (chapitre C.2) vise à mettre en application l'outil et à évaluer de manière globale ses fonctionnalités en se basant sur une étude de référence. Cette dernière a pour objet un capteur photovoltaïque étudié auparavant au travers d'une approche AMDE standard par Hans et coll. (Hans, 2007b).

Une seconde étude (chapitre C.3) se penche plus spécifiquement sur l'implémentation de données de dégradation dans la base. Avec pour base de travail une étude bibliographique des modes de dégradation des polymères, nous étudions la capacité du cadre de modélisation à représenter des modes de dégradation génériques.

Une étude complémentaire, présentée en annexe 1, aborde l'utilisation d'une famille de flux au travers de ses différents aspects : représentation des comportements nominaux et défaillants, mise à jour des modes de dégradation, etc.

C.2. Étude d'un capteur photovoltaïque

C.2.1. Cadre de l'étude

Nous proposons d'étudier ici la capacité de notre prototype à permettre la réalisation de l'étude d'un système. L'enjeu consiste à évaluer de manière globale les fonctionnalités de l'outil en se basant sur une étude AMDE de référence. L'étude en question, réalisée sous financement de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), est décrite en détail par Hans (Hans, 2007b) et porte sur un capteur photovoltaïque. Elle a été réalisée en suivant un protocole standard impliquant des experts méthodes et produits – dont les différentes étapes sont décrites au chapitre A.1.3.2 – étapes que nous rappelons ici :

- Analyse structurelle ;
- Analyse fonctionnelle ;
- Mise à jour des modes de défaillances ;
- Évaluation de la criticité.

En pratique, nous chercherons à répondre aux questions suivantes :

L'outil permet-il de représenter le système et ses modes de dégradation ?

Dans la mesure du possible les données de l'étude initiale ont été implémentées dans l'outil au plus proche des descriptions fournies. Néanmoins, des modifications ont parfois été imposées par le cadre de modélisation. Il paraît nécessaire de rappeler ici que les diverses descriptions de l'étude initiale (description fonctionnelle, choix des contraintes environnementales, etc.) visent uniquement à fournir un cadre méthodologique sur lequel les experts produit peuvent s'appuyer. En plus de cette fonctionnalité, le prototype utilise ces descriptions pour soumettre des propositions à l'utilisateur : propagation des flux, mode de dégradations à appliquer au système, etc. Cela nous amène à la question suivante.

Les résultats fournis sont-ils comparables à ceux de l'étude de référence ?

Les résultats d'une étude – mise à jour de modes de dégradations, construction d'un arbre d'état, etc. – sont dépendants de nombreux facteurs. La description initiale du système, la nature des données présentes dans les bases, d'une part,

mais également la manière dont elles sont « manipulées » par le prototype. Par exemple, l'étape de propagation des flux conditionne le choix des dégradations qui sera proposé à l'utilisateur. En d'autres termes, la question est ici de savoir si les étapes effectuées par l'outil sont pertinentes en les mettant en regard de l'étude initiale.

Nous aborderons donc successivement les différentes phases de l'étude du produit réalisée à l'aide du prototype :

- Représentation du système et de ses modes de dégradation ;
- Vérification du comportement du système par propagation des flux ;
- Mise à jour des modes de dégradation.

C.2.2. Représentation du système

C.2.2.1. Construction du modèle produit

Le choix des composants, de leurs ports et des contacts entre eux pour constituer un système est dicté par l'étape d'analyse structurelle réalisée par (Hans, 2007b). Un mode de représentation similaire a généralement été choisi. Par exemple, le composant *cellules photovoltaïques* désigne un réseau de cellules, branchées en séries et/ou en parallèle, comme dans l'étude de référence.

Une distinction réside dans le fait que Hans et coll. (Hans, 2007b) précisent le mode de liaison entre composants (p. ex. « collé », « soudé », etc.), ce que ni le cadre de modélisation ni l'outil ne prennent en compte.

Le schéma du modèle de système obtenu est représenté Figure C-1.

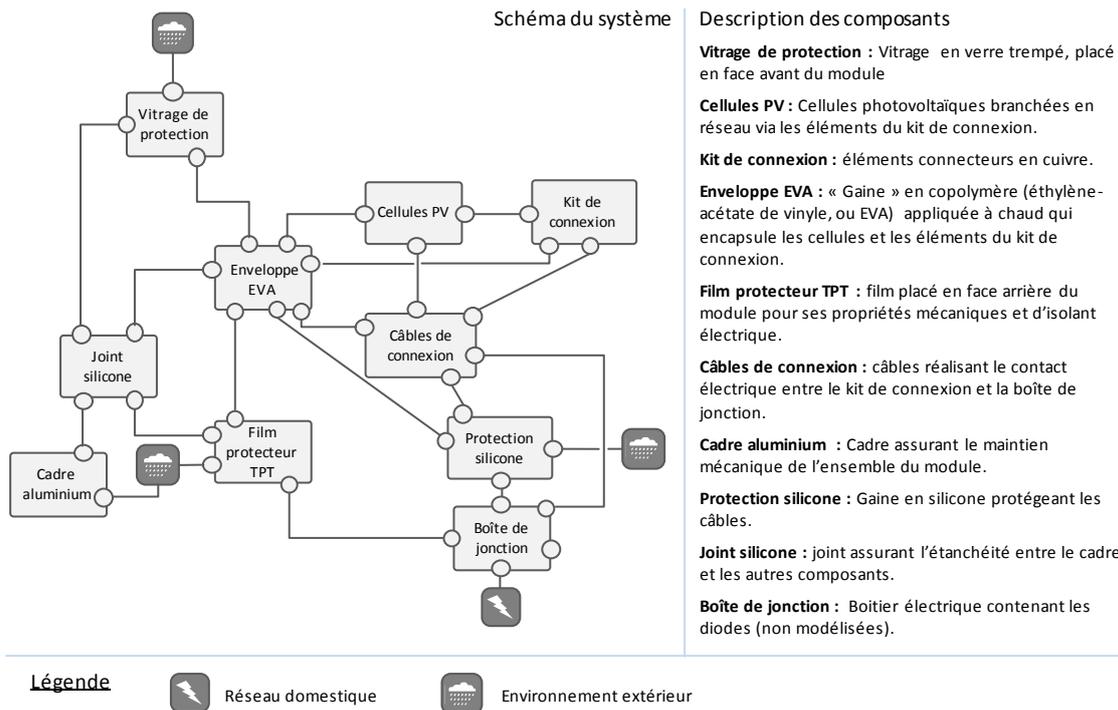


Figure C-1. Schéma du système « capteur photovoltaïque » tel qu'implémenté dans notre prototype

Une modification du périmètre de l'étude est à noter : les différentes diodes (diodes by-pass et anti retour), destinées à protéger les cellules ou l'ensemble du module, n'ont pas été représentées. Nous savons en effet que leur prise en compte au sein du modèle du système est problématique, puisqu'elle nécessite une représentation fine du fonctionnement d'un circuit électrique. Cela implique que les modes de défaillances spécifiques aux diodes, ainsi que leurs fonctions de régulation du circuit constituées par les cellules et les éléments de câblages ne sont pas pris en compte. De manière très schématique, l'occultation d'une cellule provoque, outre la diminution du courant produit, une polarisation en inverse de la cellule, ce qui la conduit à dissiper de l'énergie sous forme thermique (par effet joule), parfois jusqu'à destruction du module complet⁷. Le rôle de la diode by-pass est de dériver le courant d'une cellule pour éviter ce phénomène (en pratique, une diode by-pass est en général installée pour un groupe de cellules branchées en série).

⁷ On parle généralement de « point chaud », ou d'effet *hot spot*.

C.2.2.2. Construction des modèles de composants

Les différents modèles de composant ont été décrits à partir des descriptions fournies dans (Hans, 2007b), notamment au niveau de leurs matériaux constitutifs. Les liaisons de ces composants ont été décrites au niveau le plus générique possible, vis-à-vis des principaux types de flux :

- Matière ;
- Thermique ;
- Mécanique ;
- Rayonnement ;
- Courant électrique.

L'approche employée consiste à décrire, pour chaque couple de ports de chaque composant, une liaison pour chacun de ces types de flux. Cela est destiné à permettre la réalisation de l'étape de propagation des flux. Notons que dans le cadre d'une approche pas-à-pas, une fonctionnalité intéressante serait de permettre de construire les modèles de composants au fur et à mesure en ajoutant des liaisons quand les flux se présentent sur les ports.

La Figure C-2 montre une représentation du modèle de composant des cellules photovoltaïques, incluant la liste des liaisons décrites. Toutes ces liaisons sont bidirectionnelles, à l'exclusion des liaisons « transformer les flux de rayonnement optique en énergie électrique ». Par commodité les ports ont été nommés d'après les composants avec lesquels ils sont en contact.

Plusieurs différences existent entre les modèles de composants que nous avons développés et les descriptions fonctionnelles de l'étude initiale. Ainsi, les fonctions qui ne peuvent être exprimées en termes d'effet sur des flux, comme les fonctions de type « maintenir en position » ou « être conforme aux exigences esthétiques » ne sont évidemment pas décrites.

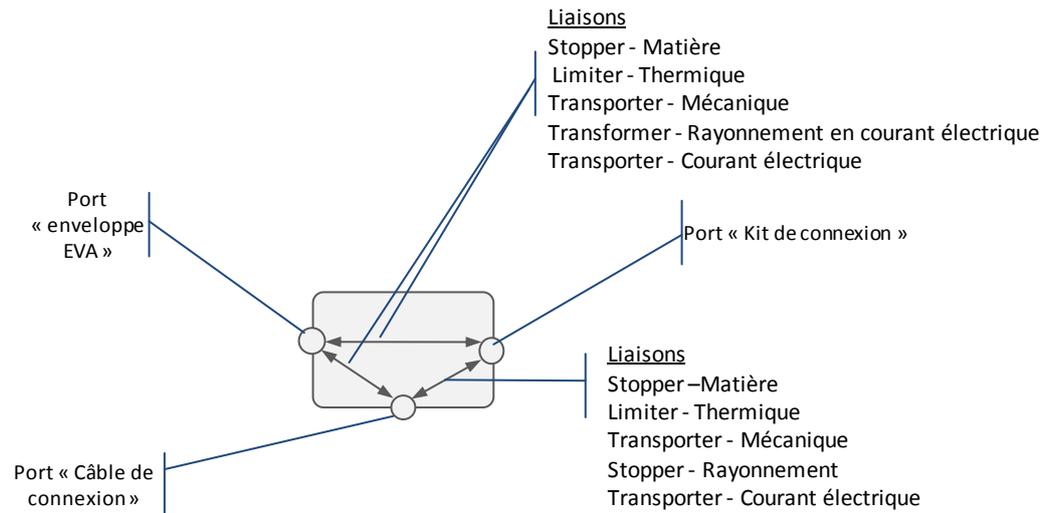


Figure C-2. Représentation du modèle de composant cellules photovoltaïques.

Par ailleurs, de nombreuses fonctions décrites dans (Hans, 2007b) sont de type « résister à un agent environnemental », par exemple « résister aux chocs thermiques », qui est attribué à tous les composants. La prise en compte de telles fonctions n'est pas possible, mais elle ne nous semble pas nécessaire. Dans le cas de l'étude initiale, elles servent d' « aide mémoire » pour la mise à jour des modes de défaillance. Dans le cadre de l'utilisation du prototype, cette fonctionnalité est assurée par la propagation des flux et la recherche des dégradations.

On remarque également que certains composants possèdent une fonction de régulation thermique, comme le composant *vitrage de protection*. La régulation thermique de l'ensemble du module est en effet un point important : un trop fort échauffement pouvant conduire, d'après (Hans, 2007b), à la destruction du système. Or, le cadre de modélisation ne permet pas d'exprimer ce type de fonction.

De manière générale, la plupart des composants que nous avons modélisés ont été décrits avec des liaisons relatives aux principaux types de flux :

- Les flux de matière : fonction *stopper* ;
- Les flux d'énergie mécanique : fonction *transporter* ;
- Les flux d'énergie thermique : fonction *limiter* ;
- Les flux d'énergie électrique : fonction *stopper* pour les composants isolant, *transporter* pour les autres.
- Les flux de rayonnement : fonction *transporter* pour les composants transparents, *stopper* pour ceux qui sont opaques.

Si la description des composants est réalisée à partir d'un ensemble de fonctions et de flux restreints, elle n'en reste pas moins longue à mettre en œuvre au niveau système, notamment à cause du nombre important de liaisons à décrire ; environ 280 pour ce système.

C.2.2.3. Représentation des modes de dégradations

La nature de la cible de chaque mode de dégradation, matériau, composant ou les deux, a été déterminée en fonction des descriptions initiales.

La modélisation des modes de dégradations est ici facilitée, car les informations dont nous disposons sont déjà décrites dans le formalisme AMDE. Plusieurs différences existent néanmoins entre les défaillances de l'étude initiale et les modes de dégradation modélisés :

- Plusieurs étapes du GED – environ un tiers – sont en réalité les effets de modes de dégradation, soit sous forme de propagation de flux, soit sous forme de modification des propriétés du composant ;
- Certains modes de défaillances semblent identiques. Ainsi « attaque chimique (corrosion) » et « oxydation, formation de sels », qui sont tous deux appliqués aux éléments en cuivre du kit de connexion, semblent décrire le même phénomène, notamment car ils ont les mêmes effets ;
- Certains modes de défaillances ne sont simplement pas représentables. C'est généralement le cas, en particulier au niveau des effets, quand ces derniers sont appliqués sur le même composant et représentent différents états de dégradation.

Ces différents points sont illustrés à l'aide d'un exemple Figure C-3 qui détaille une partie des modes de défaillances du vitrage de protection décrits dans (Hans, 2007b).

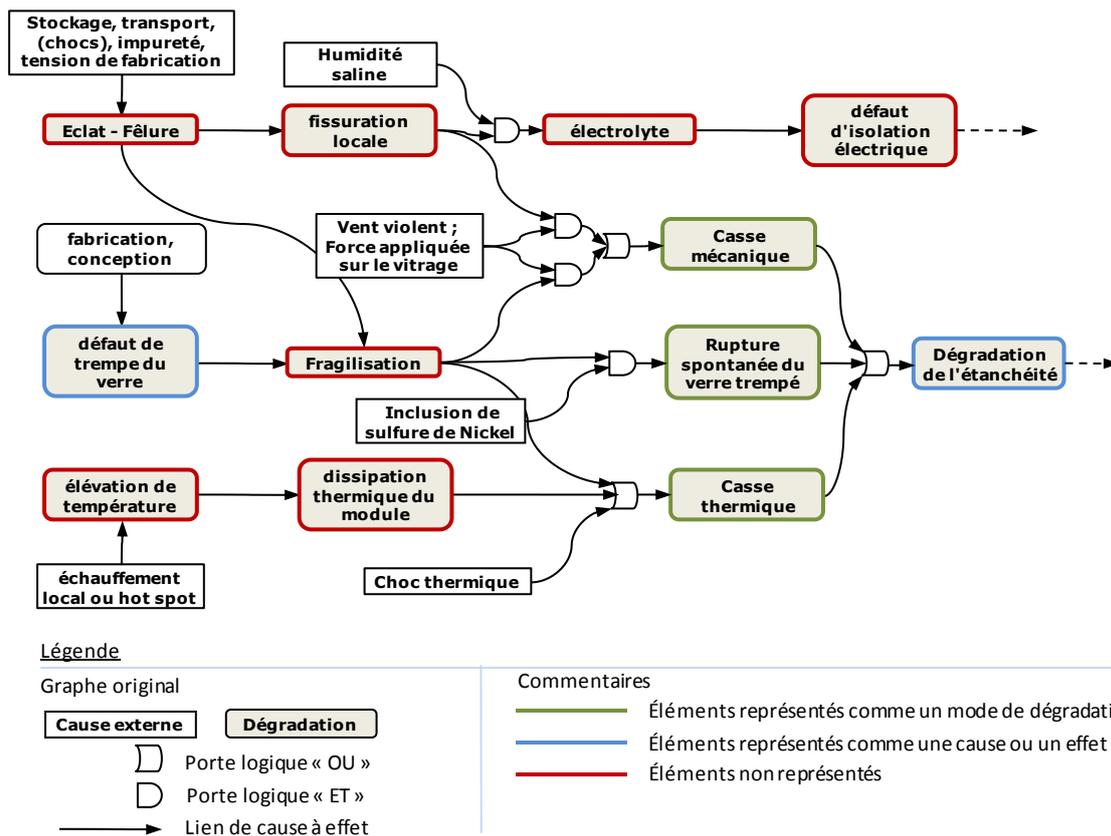


Figure C-3. Extrait du GED représentant les modes de défaillances du vitrage de protection. D'après (Hans, 2007b).

On note qu'en termes d'effets finaux – représentés par des flèches en pointillés sur le schéma – la majorité des éléments du graphe sont modélisables à l'exception de l'événement « défaut d'isolation électrique ». Ce dernier fait intervenir un phénomène de conduction de courant électrique via un liquide conducteur (électrolyte), phénomène qui n'est actuellement pas directement représentable en termes de flux.

Les événements « éclat – fêlure », « fissuration locale » et « fragilisation » représentent différents états de dégradation intermédiaire qu'il est tout à fait possible de décrire comme dégradation en termes de cibles et de causes, mais dont la description des effets est problématique. Par exemple, un mode de dégradation « fissuration locale » était initialement pris en compte, mais il n'était pas possible de distinguer ses effets de ceux du mode « casse mécanique ». De telles dégradations n'ont pas été implémentées pour simplifier l'analyse des résultats. Seuls les modes de dégradation décrivant les effets finaux ont été décrits. Ces derniers sont représentés Figure C-4 dans un formalisme similaire à celui de la Figure C-3.

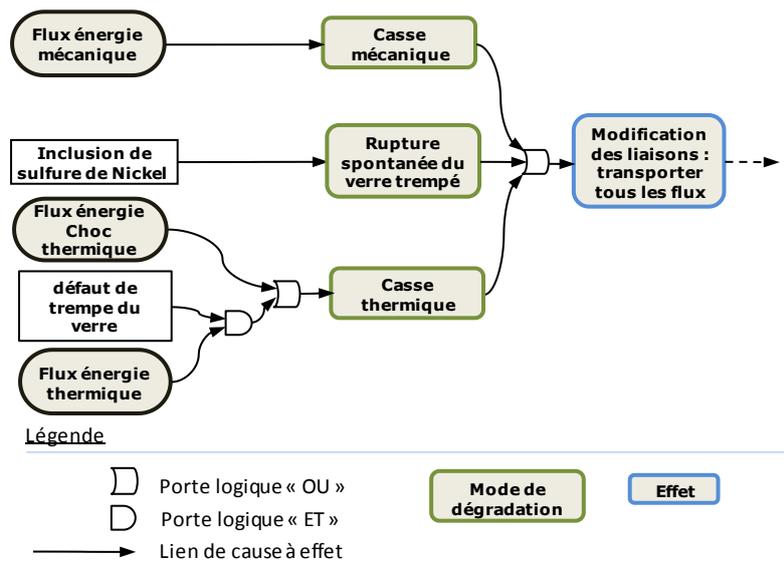


Figure C-4. Représentation des modes de dégradation implémentés dans le prototype.

Les modes de dégradations décrits Figure C-4 ont été implémentés. Leurs causes ont été traduites en termes de flux et de causes processus⁸. Dans les trois cas de casse du verre (mécanique, thermique et rupture spontanée), les effets proposés sont identiques : le remplacement de toutes les liaisons par des liaisons *transporter*. On note que les flux de type *énergie électrique* sont également concernés par les effets, mais sans référence explicite à la notion d'électrolyte.

Par ailleurs, il nous semble que ces modes de dégradations sont décrits en termes suffisamment génériques pour être utilisés dans d'autres études comportant un composant similaire.

Un processus de traduction similaire a été appliqué à l'ensemble des modes de défaillances de l'étude d'origine. Cela a conduit à la description d'une trentaine de modes de dégradation spécifiques au capteur photovoltaïque, sur les deux cents qui constituent le GED décrit dans (Hans, 2007b).

⁸ Le prototype ne permettant pas de décrire des conditions en « OU », deux modes de dégradations ont été décrits pour la casse thermique. Le premier est causé par le flux *choc thermique*, le second par une cause processus et le flux d'*énergie thermique*. Le flux *choc thermique* étant enfant du flux *énergie thermique*, sa présence sur un port déclenche les deux modes de dégradations.

C.2.3. Résultats de l'étude

C.2.3.1. Propagation des flux

La propagation des flux a été réalisée en deux étapes. Dans un premier temps seul un nombre limité de flux a été utilisé dans le but de vérifier le comportement du système modélisé. Dans un second temps un nombre de flux plus important a été pris en compte pour évaluer la mise à jour des modes de dégradation (cf. C.2.3.2).

La propagation des flux a permis de vérifier que le modèle du système se comportait de la manière attendue en l'absence de mode de dégradation, notamment :

- Les flux de matière restent systématiquement en dehors du système ;
- Les flux d'énergie thermique et mécanique sont systématiquement propagés dans tous les composants ;
- Les flux de rayonnement optique sont propagés au travers des composants transparents ;
- Le trajet du flux de type *énergie > rayonnement solaire* au travers du système permet de vérifier que la cellule le transforme effectivement en flux *d'énergie électrique*. Par ailleurs ce dernier flux est effectivement transporté hors du système, vers le réseau domestique (cf. Figure C-5).

D'un point de vue pratique, l'obtention de ce résultat a néanmoins nécessité plusieurs modifications successives du modèle du système pour corriger diverses erreurs, principalement des liaisons mal renseignées. Seuls les résultats finaux sont abordés ici.

On constate par ailleurs une amélioration importante vis-à-vis de ce que permettrait le logiciel CPAO, puisqu'il est possible d'obtenir une représentation complète du fonctionnement du système.

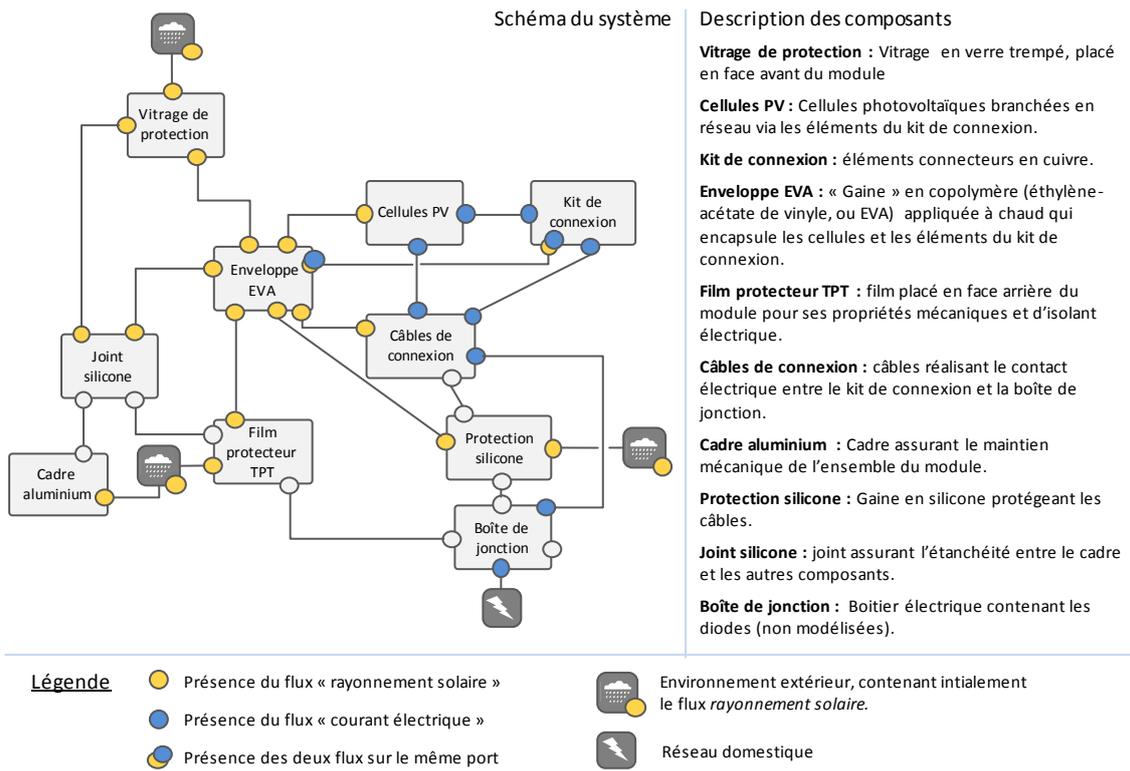


Figure C-5. Illustration du résultat de la propagation du flux « rayonnement solaire » provenant du milieu extérieur.

C.2.3.2. Modes de dégradations du système

L'analyse des logs de résultats a permis de vérifier que l'ensemble des modes de dégradation déclenché par une cause processus a été détecté. Il en va de même pour ceux présentant une cause flux, soit de manière directe quand le flux est présent dès le début de l'étude sur le port de la cible, soit suite à l'étape de propagation. Ces modes de dégradations constituent la base des graphes d'états (les dégradations initiales).

La version du prototype utilisée pour cette étude propose la construction de graphes d'état exhaustif. Ainsi, comme indiqué au chapitre B.3.4, le passage d'un état à un autre n'implique pas nécessairement l'existence d'une relation de causes à effets. En pratique, les enchaînements de dégradations décrits dans l'étude initiale sont « dispersés » au milieu des recombinaisons à différents niveaux du graphe d'état. Vérifier si l'outil permet de mettre à jour ces enchaînements de modes de dégradation a nécessité de parcourir les logs de résultats pour reconstruire ces enchaînements. Un extrait de log est présenté en annexe 2 à titre indicatif. Par ailleurs, une limitation technique empêchait la construction de graphes d'états

complets au moment où l'étude a été réalisée. Il a cependant été possible d'identifier un enchaînement présent dans le GED, qui est présenté Figure C-6.

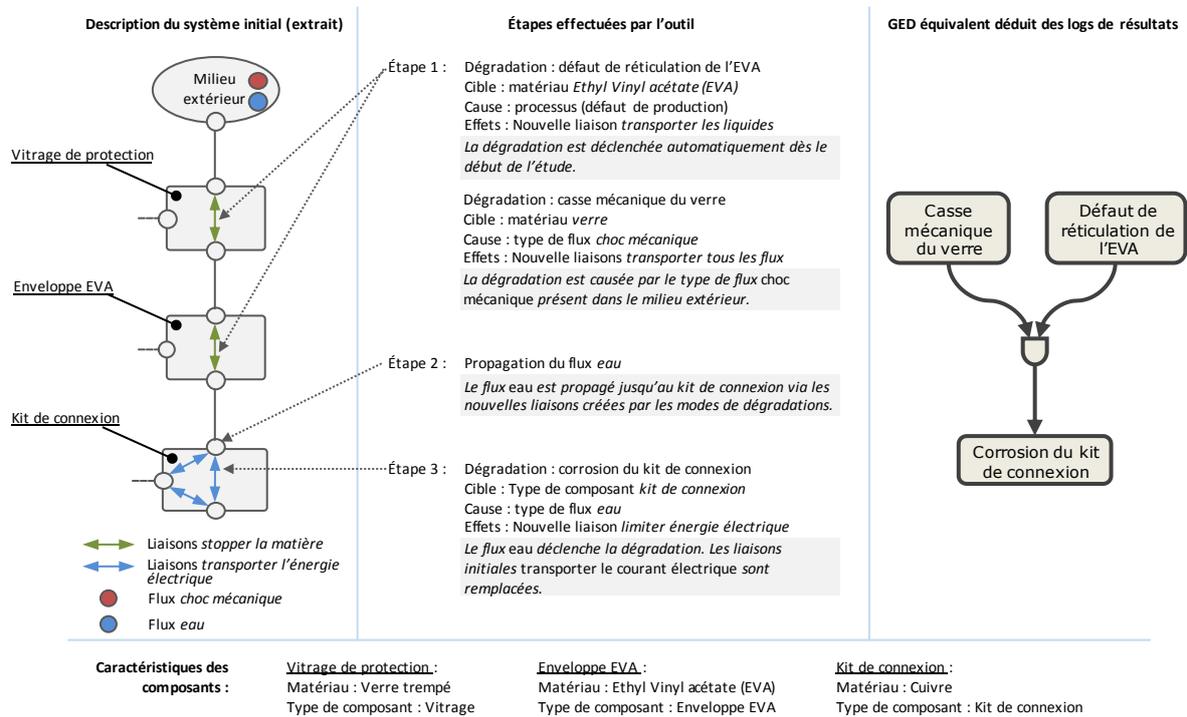


Figure C-6. Illustration de la mise à jour d'un scénario de dégradation par le prototype et représentation du GED équivalent.

Cet enchaînement implique les dégradations simultanées de deux composants du système : le *vitrage de protection* et l'*enveloppe EVA*. Ces deux modes de dégradation sont déclenchés dès le début de l'étude et sont respectivement causés par un flux de *choc mécanique*, présent au contact du composant affecté, et une erreur de processus (cf. étape 1 Figure C-6).

Dans le cas de la dégradation de l'*enveloppe EVA*, la dégradation est détectée, car le type de matériau du composant et la cible de la dégradation correspondent. La *casse mécanique du verre* est proposée, car la cible de la dégradation (le type de matériau *verre*) est parente du type de matériau du composant affecté (type de matériau *verre trempé*).

La prise en compte des effets de ces dégradations implique des modifications de liaisons, modifications qui sont appliquées par l'outil à l'aide de règles prédéfinies (cf. chapitre B.4). En pratique les liaisons *stopper la matière* du composant *vitrage de protection* sont remplacées par des liaisons *transporter la matière*. Les liaisons

stopper la matière du composant *enveloppe EVA* sont remplacées par des jeux de trois liaisons : *stopper les solides*, *stopper les gaz* et *transporter les liquides*⁹.

Ainsi, lors de l'étape de propagation, le flux *eau* est propagé au travers des deux composants dégradés *via* les nouvelles liaisons (cf. étape 2 Figure C-6) jusqu'au composant *kit de connexion*. La présence de ce flux permet de déclencher la dégradation *corrosion du kit de connexion* (cf. étape 3 Figure C-6).

Dans l'étude initiale, l'effet final de cet enchaînement est décrit comme une perte de productivité du module suite à l'oxydation du *kit de connexion*¹⁰. Dans le cadre de notre approche l'effet est traduit par le remplacement des liaisons *transporter l'énergie électrique* en liaisons *limiter l'énergie électrique*. Nous notons que cet effet n'a pas de répercussion sur le comportement du modèle du système du point de vue de la propagation des flux. En effet, il n'est pas réalisé de distinction entre les flux migrés *via* une liaison *transporter* et ceux migrés *via* une liaison *limiter*.

⁹ L'effet de la dégradation est *transporter les liquides* alors que la liaison initiale est *stopper la matière*. Dans ce cas, deux liaisons s'appliquant aux types de flux *solide* et *gaz*, qui sont enfants du type de flux *matière*, au même titre que *liquide*, sont également créées.

¹⁰ Les éléments d'explication évoqués dans l'étude initiale font intervenir une réduction du diamètre des éléments du kit de connexion qui entraînerait une augmentation de la résistivité.

C.2.4. Analyse des résultats et propositions

L'étude réalisée à l'aide du prototype permet de réaliser les premières étapes de l'étude initiale. Nous en reprenons ici les points clefs.

Du point de vue de la représentation des différentes données décrites dans l'étude initiale, nous remarquons que la description du système d'un point de vue structurel et fonctionnel ne pose pas de difficultés particulières, sauf, nous l'avons vu, dans le cas des diodes. En ce qui concerne les composants, on note que la description de leurs liaisons pourrait être simplifiée. Par exemple, la description du composant *enveloppe EVA* fait appel à près d'une centaine de liaisons en tout, mais uniquement cinq types de liaisons différentes. Proposer des liaisons par défaut lors de la construction des modèles de composants devrait permettre un gain de temps considérable.

Il est également possible de décrire l'ensemble des modes de dégradations de l'étude en termes de cible et de causes. Néanmoins, seuls les effets d'une partie d'entre eux sont modélisables par des modifications de liaison. Il manque, en particulier, la possibilité de décrire un mode de dégradation comme étant causé directement par un autre, ce qui revient à décrire *a priori* un enchaînement de modes de dégradations. Cela permettrait, par exemple, de prendre en compte de manière plus complète les modes de dégradation du composant *vitrage de protection*, décrits Figure C-3. Une solution à ce problème sera proposée en partie C.3.3.

L'étape de propagation des flux permet de rendre compte, dans une certaine mesure, du fonctionnement du modèle du capteur photovoltaïque. On note néanmoins que certains flux, *énergie thermique* et *énergie mécanique*, sont propagés de manière systématique à travers tous les composants. Il n'est pas possible, en l'état actuel, de les prendre en compte plus finement. Cette problématique est étudiée plus en détail dans l'annexe 1. Par ailleurs, certains phénomènes restent difficiles à représenter (p. ex. conduction de courant électrique par un électrolyte).

La recherche des modes de dégradation s'est avérée opérationnelle, l'ensemble des dégradations qui devaient être détectées après la première propagation des flux l'ont été. Par ailleurs, il a été possible de mettre à jour un premier enchaînement de dégradations de manière pertinente. Il est plus que probable que la construction

automatisée du graphe d'état complet aurait révélé des enchaînements inattendus pour lesquels nous pouvons *a priori* déterminer deux cas de figure :

- L'enchaînement n'est pas présent dans le GED initial, mais il semble plausible ;
- L'enchaînement paraît « faux » en regard des connaissances de l'utilisateur.

C'est bien entendu les proportions respectives de ces deux cas qui permettraient d'évaluer au mieux l'intérêt du mode de construction automatisé. Néanmoins, déterminer ces enchaînements de manière automatisée nous apparaît comme particulièrement intéressant.

Nous notons également que l'ensemble de ces résultats repose sur une bonne construction initiale du modèle du système et une description adéquate des effets des modes de dégradation. Ils nécessitent par ailleurs d'exploiter le contenu des logs de résultats (propagation des flux et arbre d'état). Or, la lecture de ces derniers se révèle ardue à cause du volume d'information qu'ils renferment. Ce point particulier appelle deux remarques. D'une part le développement d'une interface graphique simplifierait la phase d'analyse des résultats. D'autre part, l'algorithme de recherche des modes de dégradation est perfectible. Nous avons avancé que la mise à jour automatisée des enchaînements de modes de dégradation nécessite une construction exhaustive des graphes d'états. Néanmoins, de nombreux enchaînements ne conduisent pas à la mise à jour de nouveaux modes de dégradation. L'algorithme doit donc être modifié pour présenter de manière sélective les enchaînements pertinents. Nous pouvons distinguer deux types d'approches pour parvenir à ce résultat.

La première approche consiste à effectuer un post-traitement des graphes d'état déjà construits. Dans ce registre, une solution simple à implémenter consisterait à identifier les modes de dégradation non présents à la première itération. Cette solution est uniquement indicative, puisqu'elle ne préserve pas les relations de causes à effets.

La seconde approche reposerait sur une modification du mode de construction des graphes. Par exemple, nous supposons que l'ordre dans lequel les modes de dégradation sont mis à jour n'a pas d'influence sur la découverte des autres modes.

Ce point particulier nécessite une vérification que nous n'avons pu effectuer faute de temps. Mais, dans le cas où cela s'avérerait exact, il serait possible de limiter considérablement la taille des graphes d'états.

C.2.5. Conclusions de l'étude du capteur photovoltaïque

Le prototype s'est révélé opérationnel pour les premières phases de l'étude. Ainsi les premiers modes de dégradation sont mis à jour de manière conforme aux attentes. Néanmoins la phase de construction des arbres d'états est perfectible. D'un point de vue pratique la nécessité d'exploiter les logs de résultats reste un frein à l'utilisation de l'outil. Le développement d'une interface graphique permettant une meilleure exploitation des résultats s'avère nécessaire. Cette interface devrait couvrir les fonctionnalités suivantes :

- La visualisation de l'état du système à un instant donné de l'étude (état des composants et présence des flux) ;
- Visualisation des enchaînements de dégradations.

C.3. Enrichissement de la base de données de dégradation

L'étude du capteur photovoltaïque, décrite au chapitre précédent, a montré que le cadre de modélisation et l'outil permettaient de :

- décrire des modes de dégradations ;
- les implémenter dans la base de données de l'outil ;
- les utiliser dans le cadre de l'étude d'un système.

Pour cela, nous nous sommes basés sur une étude existante, ce qui avait pour avantage de fournir un ensemble de modes de dégradations déjà identifiées et décrites dans le formalisme AMDE (c.-à-d. causes-cibles-effets).

La bonne conduite d'une étude suppose que de tels modes de dégradations aient été décrits et implémentés dans la base de données, ce qui peut être réalisé au cours de l'étude d'un produit.

Néanmoins, la constitution d'un ensemble de données de modes de dégradations servant à initier les premières études nous semblait nécessaire. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes concentrés plus spécifiquement sur le second point, ce qui a abouti à la constitution d'un jeu de données de dégradation.

Nous avons pour cela repris certaines des données déjà présentes dans le logiciel CPAO en les complétant par des sources issues de la littérature, en particulier celles issues des travaux d'Offenstein (Offenstein, 1988). La liste des modes de dégradation implémentés – environ six cents items - est présentée en annexe 3.

Nous proposons ici de discuter plus spécifiquement de l'intégration de données issues de la littérature. Notre propos sera illustré par différents modes de dégradation s'appliquant à une famille de matériaux : les polymères synthétiques.

C.3.1. Description des matériaux

Le cadre de modélisation prévoit la description des matériaux constitutifs des composants et éventuellement de leurs ports. Les types de matériaux sont organisés au sein d'une classification dont un extrait est présenté Figure C-7.

D'un point de vue pratique l'implémentation de la base de données de matériaux du prototype a été réalisée à partir des données déjà présentes dans l'outil CPAO

(environ 350 items), qui ont été réorganisées, filtrées de certaines informations qui semblaient non pertinentes et augmentées de données provenant de la littérature.

La base compte actuellement 450 items, dont les principales familles de polymères de grande diffusion.

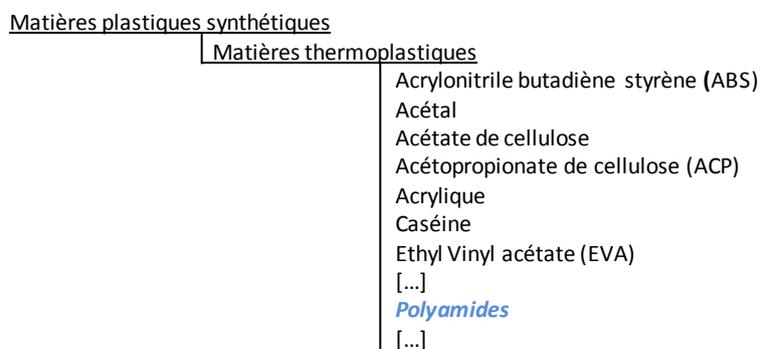


Figure C-7. Extrait de la classification des matériaux, telle qu'implémentée dans l'outil montrant la place du type « Polyamides ».

Nous rappelons ici que la description du matériau d'un composant est utilisée par l'outil pour proposer des modes de dégradations. Ainsi, un mode de dégradation ayant pour cible *matière thermoplastique* sera proposé si le composant est décrit avec ce type de matériau ou un de ses enfants (p. ex. *polyamides*).

Les différents items présents dans la base de données de matériaux nous semblent correspondre aux descriptions des matériaux constitutifs rencontrés dans la pratique (descriptifs techniques fournis par les fabricants, avis techniques, rapports d'essais, etc.).

Cependant, pour Brown et Greenwood (Brown, 2002), décrire des matériaux polymères uniquement par leur appartenance à une famille est loin d'être suffisant dans le cadre de l'étude de la durabilité. Pour l'auteur la description des polymères doit comprendre :

- Le type du polymère ;
- La structure moléculaire : poids moléculaire, cristallinité, taux de réticulation, etc. ;
- La liste et les concentrations des additifs employés ;
- Les étapes de fabrication.

Chacun de ces paramètres peut en effet jouer de manière importante sur le comportement dans un environnement donné. Brown et Greenwood (*ibid.*) précise

par exemple que de nombreux polymères seraient inemployables sans additifs, leur utilisation pouvant augmenter d'un facteur 100 la durée de vie utile.

Il apparaît qu'une description plus fine des matériaux est à envisager, ce qui implique une évolution du cadre de modélisation. La nature de cette évolution sera abordée dans les parties suivantes. Néanmoins il est nécessaire de s'assurer de la qualité des informations qu'il est déjà possible de décrire, en particulier en vérifiant si le niveau de description de chaque item est pertinent. La Figure C-8 reprend ainsi un extrait de la classification après « extension » de la famille *polyamides* d'après (Guérin, 1994).

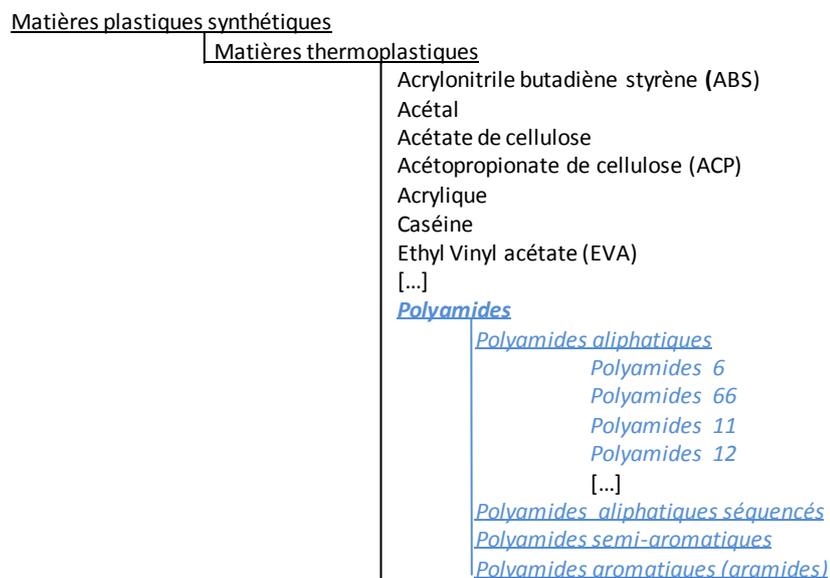


Figure C-8. Extrait de la classification des matériaux, telle qu'implémentée dans l'outil montrant la place du type « Polyamides » après ajout des sous-types.

S'assurer du bon niveau de description de chaque famille de matériau est primordial. Au sein d'une même famille, les différences de propriétés peuvent être importantes (p. ex. Nylon®, un type de polyamide aliphatique, et le Kevlar®, un aramide possède des comportements à haute température très différents). Il est possible d'affiner la description d'une famille particulière jusqu'au niveau des différents grades¹¹ proposés par les industries des polymères. Néanmoins, ces derniers sont très nombreux : on compte par exemple 18.000 grades différents sur

¹¹ En plasturgie, la notion de *grade* désigne une variation d'un matériau de base. Pour un type de polymère donné, différents grades sont disponibles, la différence étant généralement l'indice de viscosité qui impacte les possibilités de mise en forme ainsi que les propriétés mécaniques de la pièce (Whelan, 1994).

le marché américain (en 2003). Il serait donc intéressant d'intégrer directement ce type d'information à partir de bases de données existantes.

C.3.2. Données de dégradations disponibles dans la littérature

C.3.2.1. Description des cibles et des causes

Nous proposons de décrire plusieurs cas d'intégration de modes de dégradation dans la base de données à partir d'informations provenant de la littérature.

Il est généralement considéré que les principaux mécanismes de dégradation des polymères sont connus (Brown, 2002), (Wright, 2001).

Par exemple, Fayolle (Fayolle, 2005) explique que l'on distingue en général trois grandes familles de mécanismes de vieillissement (physique, chimique et mécanique) et précise les principaux types de couplages possibles que l'on peut rencontrer (cf. Tableau 4).

Famille de processus de vieillissement	Pas d'interaction avec l'environnement I	interaction avec l'environnement E	Couplages physico-chimiques	Couplages physico-chimiques et mécaniques
Vieillessement physique P	- Relaxation structurale IP1 - Migration d'adjuvants IP2	Absorption de solvants EP2	Extraction d'adjuvant en milieu liquide IP2+EP2	« Stress-cracking » en milieu solvant IMi+EP2 Choc hygrothermique IMi +EP2
Vieillessement chimique C	Vieillessement thermique anaérobie IC1	-Thermo-oxydation - Vieillessement photochimique EC2 - Vieillessement radiochimique EC3 - Vieillessement en milieu réactif EC4 - Vieillessement biochimique EC5	- Vieillessement chimique avec perte de stabilisation IP2+ECi -Vieillessement chimique et plastification	-Couplage fissuration oxydation IMi+ECi -Vieillessement sous contrainte -Couplage fissuration vieillissement chimique IMi+EC4
Vieillessement mécanique M	-Fluage relaxation IM1 - Fatigue IM2 -Usure IM3			

Tableau 4. Principaux types de vieillissement des polymères et couplages, d'après Fayolle (Fayolle, 2005).

Certaines des informations contenues dans ce tableau sont « traductibles » en mode de dégradations. Ainsi, le vieillissement photochimique (photo-oxydation) et le vieillissement thermique (thermo-oxydation), sont décrits dans la base de données comme ciblant tous les types de polymères et comme étant causés respectivement par les flux de type *Rayonnement ultra-violet* et *Température élevée*. Nous traiterons plus en détail le premier, avant d'aborder les autres modes de vieillissement décrits dans le Tableau 4.

C.3.2.1.1. Phénomènes de photo-oxydation

La sensibilité des polymères aux rayonnements UV est une question complexe. Ainsi, si l'énergie de ce type de rayonnement est suffisante pour rompre n'importe laquelle des liaisons covalentes, c'est la capacité du polymère à absorber le rayonnement qui conditionne la possibilité d'une dégradation (Brown, 2002). Or, en théorie, certains polymères purs sont transparents aux UV et les interactions rayonnement-matière ont lieu uniquement au niveau des imperfections présentes dans le matériau : extrémités de chaînes, insaturations résiduelles, résidus de catalyseurs, composants créés lors du processus de mise en forme, etc.

En pratique, la grande majorité des polymères produits est affectée, car ils présentent de telles impuretés, à l'exception notable de quelques-uns comme le PMMA. Ce dernier est généralement considéré comme ayant une excellente résistance aux rayonnements UV, résistance que l'auteur attribue à la pureté du matériau tel qu'il est généralement produit (*ibid.*). La sensibilité des polymères aux UV est donc également une question de processus de fabrication. De plus, il faut également prendre en compte le fait que de nombreux types d'additifs destinés à protéger les polymères de l'action des UV existent, et que leur utilisation, qui est généralisée, peut modifier considérablement la cinétique de la dégradation (Pfaendner, 2006).

Malgré cette imprécision sur les cibles, il nous semble nécessaire de proposer ce mode de dégradation. Il affectera par défaut tout composant ayant comme matériaux constitutifs n'importe quel type de polymère, sans faire de discrimination entre ceux qui y sont particulièrement « résistants » et les autres. Il appartient ensuite à l'utilisateur de vérifier si ce mode de dégradation est applicable dans son cas.

Par ailleurs, la pertinence de la dégradation dépend du niveau de description du matériau pour laquelle elle est proposée. Si elle est proposée pour une catégorie spécifique de polymère, il existe un risque qu'elle ne soit pas « juste » (cas du PMMA). Au contraire, si elle est proposée pour un composant décrit à un niveau générique (p. ex. avec pour type de matériau *polymère* ou *polymère thermodurcissable*) elle conserve toute sa pertinence.

Au travers de ce cas précis, nous pouvons constater qu'une prise en compte plus fine des connaissances relatives aux phénomènes de dégradation est nécessaire si nous voulons proposer de manière adéquate un mode de dégradation. Cela repose pour partie sur une description plus fine des types de matériaux. Nous reviendrons sur ces aspects en partie C.3.3.

C.3.2.1.2. Autres phénomènes génériques

La traduction de certains des autres mécanismes décrits dans le Tableau 4 pose différents problèmes au niveau de leur représentation et de leur prise en compte. Par exemple, le vieillissement physique anaérobie et vieillissement radiochimique ne peuvent pas être causés par des flux. Dans le premier cas, le mécanisme n'a lieu qu'en absence d'oxygène alors le cadre de modélisation ne prévoit pas que l'absence d'un flux puisse être une cause. Dans le second les flux de type *rayonnement ionisant* ne font pas partie de la liste des flux pris en compte. Pour plusieurs raisons ils apparaissent comme anecdotiques vis-à-vis de notre problématique¹².

D'autres types de phénomènes sont plus problématiques. Ainsi le vieillissement *en milieu réactif* et *l'absorption de solvants* sont décrits de manière trop générique. En pratique ces mécanismes dépendent des couples polymère-milieux et polymère-solvant en question. Naturellement, cette remarque s'applique également aux modes de vieillissement avec lesquels ils sont combinés et qui sont présentés dans les deux colonnes de droite du Tableau 4, comme le « stress cracking » (fissuration sous contrainte) ou le couplage fissuration-oxydation. La littérature fournit généralement des listes d'agents susceptibles d'être la cause de ces détériorations, même si le niveau de description de ces agents est variable.

Concernant la fissuration sous contrainte, Wright évoque ainsi les lubrifiants, adhésifs, inhibiteurs de corrosion, surfactants, agents nettoyants, solvants, peintures et gaz propulseurs d'aérosols¹³ (Wright, 2001). On note que certains des éléments de cette liste peuvent être considérés également comme des éléments d'un système (peintures, adhésifs, lubrifiant) ce qui entraîne que ce type de dégradation peut également être considéré comme une incompatibilité.

¹² Ainsi, le vieillissement radiochimique n'apparaît que dans certains types d'applications : le domaine nucléaire évidemment, mais également les domaines médicaux et alimentaires, où des rayonnements γ peuvent intervenir comme agent stérilisateur. L'auteur semble considérer que le niveau de radiation naturel n'est pas suffisant pour provoquer ce phénomène (Wright, 2001).

¹³ Le point commun, généralement admis, entre ces substances est la présence de molécules organiques de faible masse moléculaire (*ibid.*).

C.3.2.2. Description des effets

À l'échelle macroscopique, celle du produit et du composant, les effets des modes de dégradation des polymères sont très souvent similaires. (Wright, 2001) évoque ainsi : une modification de l'aspect (changement de couleur, d'aspect de surface ou perte de transparence) puis des modifications des propriétés mécaniques, l'effet ultime étant généralement une rupture, fragile ou ductile selon le mode d'endommagement.

Par ailleurs, il faut ensuite considérer les relations entre les divers modes de dégradation applicables. En effet, le phénomène de photo-oxydation interviendra de manière quasi certaine en synergie avec d'autres phénomènes, comme la thermo-oxydation (Wright, 2001). Leurs effets se conjuguent, parfois avec ceux d'autres dégradations, pour constituer la dégradation globale du composant dans un environnement. Il apparaît nécessaire de pouvoir indiquer que ces phénomènes sont liés et la nature cumulative de leurs effets.

Ces deux phénomènes, thermo et photo-oxydation, sont décrits dans la base de données de l'outil et proposés lors d'une étude quand les conditions de cibles et de causes sont présentes. En revanche, les effets proposés sont similaires à ceux d'une rupture fragile : le caractère progressif des dégradations (modification de l'aspect, puis des propriétés mécaniques) n'est pas pris en compte.

C.3.3. Analyses et propositions

En premier lieu, une modification du cadre de modélisation et de l'outil semble nécessaire pour prendre en compte de manière directe certains enchainements de dégradations. Nous rappelons qu'en l'état actuel une nouvelle dégradation ne peut être proposée que suite à une propagation de flux consécutive à une modification de liaison. Cela implique qu'un enchainement de dégradation sur le même composant est difficile à décrire. L'introduction de cause dégradation (une dégradation en causant directement une autre) permettrait de proposer directement de tels enchainements de dégradation. La Figure C-9 illustre ce principe avec pour exemple le phénomène de photo-oxydation et ses conséquences en termes de nouvelles dégradations et de modifications de liaisons.

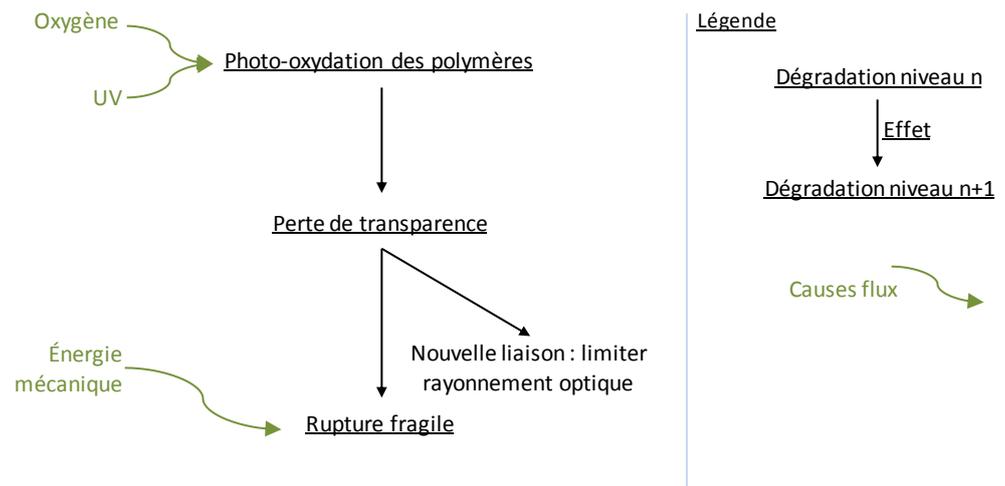


Figure C-9. Enchaînement de dégradations suite au phénomène de photo-oxydation

Cette modification, relativement simple à implémenter dans l'outil, permettrait de constituer *a priori* des scénarii de dégradation et de les soumettre à l'utilisateur quand le premier mode de dégradation est détecté.

Par ailleurs, l'outil devra également être modifié pour prendre en compte les synergies entre dégradations, a minima en introduisant une nouvelle relation entre les modes de dégradation. Un mécanisme permettant d'avertir l'utilisateur si deux modes de dégradation « liés » sont proposés pour le même composant serait également à prévoir.

Une description poussée des mécanismes de dégradation nous semble nécessaire pour prendre en compte de manière plus pertinente les phénomènes de dégradation. Par exemple, nous avons vu que l'ensemble des types de polymères est impacté – à un degré plus ou moins important – par les phénomènes de photo et thermo-oxydation. L'outil permet actuellement, dans une certaine mesure, de prévenir l'utilisateur de l'existence de modes de dégradation décrivant ces phénomènes. Les écarter d'une étude – ou les prendre en compte – implique en revanche la mise en œuvre de connaissances qui vont au-delà de ce que le cadre de modélisation est capable de représenter. Il est toujours possible de fournir une description exhaustive de chaque mode de dégradation sous forme de texte et de références (le prototype dispose de ces fonctionnalités) ; mais la décision repose *in fine* uniquement sur l'expertise de l'utilisateur.

Partant de ce constat, l'apport d'éléments d'aide à la décision, description textuelle mise à part, peut être envisagé de plusieurs manières.

Premièrement, la question de la prise en compte d'un mode de dégradation dans un cas donné peut être ramenée à une évaluation de la cinétique et de la probabilité d'occurrence du phénomène qu'il décrit. En d'autres termes, il s'agit de comparer la durée nécessaire pour que les effets de la dégradation impactent le système à une durée de référence, choisie par l'utilisateur. Cette dernière peut par exemple représenter une durée de vie espérée qui constituerait le cadre temporel de l'étude. Nous rejoignons ici la notion de criticité basée sur des éléments temporels développés par Lair (Lair, 2000a) puis Talon (Talon, 2006) abordés au chapitre A.1.3. Nous renvoyons le lecteur à ces deux auteurs pour plus de détails.

Deuxièmement, de nombreuses informations disponibles ne sont pas de nature quantitative, citons par exemple Wright, qui fait référence au phénomène de photo-oxydation :

« [...] la présence de fibre (fibres de verre et de carbone) protège en général les polymères de l'action des UV, soit en absorbant directement le rayonnement, soit en diminuant la fragilité de la surface dégradée [...] les bénéfices en termes de conservation des propriétés mécaniques peuvent être très importants ».

Traduit d'après (Wright, 2001)

L'auteur énonce ici une règle générale, issue de son expérience, qui fait intervenir une description du matériau (le type de matériau impacté ainsi que la présence de charges) ainsi qu'un ensemble de propriétés physiques. Si ce type d'information n'est pas immédiatement exploitable, il peut le devenir si nous disposons d'une donnée de référence servant de point de comparaison. Dans cet exemple, cette dernière pourrait être une durée de vie utile¹⁴ d'un polymère non renforcé par des fibres. Il est alors possible de déduire que ce mode de dégradation affectera plus tard un polymère renforcé.

Ce type de raisonnement peut être réalisé en se basant sur une approche qualitative similaire à celle décrite par Lair (Lair, 2000b) que nous avons évoqué au chapitre A.2.2.2. Sa mise en œuvre implique la mise à jour des relations causales entre les différents paramètres qui interviennent dans la description des modes de

¹⁴ Ou tout type d'indicateur, comme une courbe de variation d'une propriété mécanique dans le temps.

dégradation. On note également que les approches qualitatives et quantitatives ne sont pas à opposer, mais plutôt à envisager de manière complémentaire.

Dans tous les cas, il est nécessaire d'affiner les descriptions des matériaux des composants, en incluant, dans le cas des polymères, des informations relatives aux divers paramètres proposés par Brown (Brown, 2002) que nous avons évoqués : structure moléculaire, liste et les concentrations des additifs employés et étapes de fabrication. Il est plus que probable que ces informations ne sont pas toutes disponibles pour une étude donnée¹⁵. Elles permettront néanmoins une meilleure définition des modes de dégradations.

¹⁵ L'obtention d'information sur une formulation donnée selon les recommandations de Brown et Greenwood (Brown, 2002) se heurte à plusieurs difficultés, la principale étant la protection du secret industriel.

Conclusions et perspectives

Rappel des objectifs

Nos travaux avaient comme objectif final le développement d'un outil d'aide à l'analyse des risques. Cet objectif principal a été divisé en plusieurs sous objectifs, que nous rappelons ici :

- Faciliter la conduite d'une étude, notamment en permettant à un agent de réaliser l'étude en autonomie ;
- Diminuer le temps nécessaire à l'obtention des résultats, notamment en automatisant certaines étapes ;
- Permettre le partage des connaissances relatives aux produits et à leurs modes de défaillances ;
- Être applicable à l'ensemble des familles de produits du bâtiment.

Nous avons choisi d'insister plus particulièrement sur l'aspect automatisation, ce qui nous a conduits à développer un cadre pour la modélisation des produits. Ce dernier a été implémenté au sein d'un prototype logiciel suivant nos spécifications. L'automatisation de l'étude a été envisagée sous plusieurs aspects : d'une part la mise à jour des modes de dégradations à partir d'une description simplifiée d'un système et de son environnement. D'autre part l'application et la prise en compte des effets de ces modes de dégradations.

Ces différents aspects impliquent de pouvoir simuler le comportement du système étudié. Nous avons donc déterminé, parmi la littérature, les éléments permettant ces fonctionnalités : modélisation à base de flux et description des produits comme des réseaux de composants.

Plusieurs études ont ensuite été menées pour évaluer la capacité de l'outil et du cadre de modélisation à répondre aux différents niveaux d'objectifs. Dans un premier temps une mise en application de l'outil a été entreprise (étude d'un capteur photovoltaïque. L'étude suivante s'est appliquée à évaluer l'implémentation de nouveaux modes de dégradations au sein des bases de données à partir d'informations issues de la littérature. Finalement, différents aspects liés à la représentation d'une famille de flux ont été abordés (annexe 1).

Ces différentes études nous ont permis de fournir les premiers éléments de conclusion vis-à-vis des objectifs fixés que nous développons ici.

Évaluation du cadre de modélisation

La mise à jour des modes de dégradations par l'outil dépend pour partie de la simulation fonctionnelle (la propagation des flux dans le système). Cette dernière, si le modèle est bien construit, peut s'avérer satisfaisante, comme dans le cas des flux de rayonnement optique et d'énergie électrique de l'étude du capteur photovoltaïque. Dans d'autres cas, en particulier les flux d'énergie mécanique le cadre de modélisation ne permet pas toujours de construire des modèles dont le comportement est conforme aux attentes du modélisateur. Cela entraîne un risque de non détection des modes de dégradations ou de faux positifs.

Ces différents aspects méritent d'être étudiés plus en profondeur, par familles de flux et pour différents types de systèmes. Néanmoins, il va de soit que les imprécisions quant à la représentation des comportements sont intimement liées à l'aspect simplifié et qualitatif du cadre de modélisation. Les évolutions futures devront prendre en compte la nécessité de conserver une modélisation simple des systèmes.

Nous pouvons également noter les travaux récents de Jensen *et coll.* (Jensen, 2009) dont l'approche possède plusieurs points communs avec la nôtre. Ils s'appuient notamment sur le Functional Basis (Hirtz, 2000). Ils considèrent également que les flux permettent simultanément la description des fonctionnalités comme la cause des défaillances.

Évaluation du prototype

Les différentes études et mises en application nous permettent d'émettre des conclusions quant aux différents objectifs qui étaient fixés et dont nous reprenons la liste ci-dessous :

Faciliter la conduite d'une étude notamment en permettant à un agent de réaliser l'étude en autonomie : Le prototype développé selon nos spécifications

permet de réaliser la plus grande partie de l'étude d'un produit. La réalisation d'une étude nécessite de s'approprier l'outil ainsi que les notions de base du cadre de modélisation. Nous avons voulu ces dernières abordables pour faciliter la description des produits. Les aspects ergonomiques mis à part, cette dernière nous paraît comparativement plus simple que celle utilisée, par exemple, par CPAO. La réduction du nombre de fonctions ainsi que la restructuration des agents environnementaux en classes de flux permet une description plus compacte des composants. L'ajout de la notion de port, et donc le caractère directif des fonctions, était nécessaire pour améliorer l'aspect simulation. Cela conduit, pour certains composants, à multiplier le nombre de liaisons et donc à alourdir la description. Nous avons néanmoins vu que pour un composant donné les liaisons étaient parfois largement redondantes : une interface permettant la création rapide des liaisons des composants devrait pouvoir y remédier et par conséquent diminuer drastiquement le temps nécessaire à la description d'un système.

Si le mode de représentation que nous avons défini paraît intuitif, la rédaction d'un manuel de l'utilisateur reste à envisager. Ce dernier devra expliciter le fonctionnement de l'outil ainsi que définir un ensemble de bonnes pratiques de modélisation.

Diminuer le temps nécessaire à l'obtention des résultats, notamment en automatisant certaines étapes : L'étude du capteur PV apporte des éléments dans ce sens. Comparé à CPAO les modèles des systèmes sont simulables et la prise en compte des effets des dégradations est automatisée.

Le point critique qui devrait faire l'objet de développements futurs reste à nos yeux l'étape de construction des enchaînements de dégradations. Si l'identification des premiers modes de dégradation de l'étude du capteur photovoltaïque s'est avérée satisfaisante, l'étape de construction des enchaînements doit être améliorée pour autoriser une identification plus aisée de nouvelles dégradations (non mises à jour à la première itération).

Par ailleurs, l'application des effets doit être étudiée plus avant. Elle est basée sur un ensemble de règles qui considèrent, par exemple, que toutes les liaisons d'un composant doivent être modifiées en cas de dégradation. Il nous paraît nécessaire d'implémenter un mécanisme permettant un contrôle plus fin des effets par l'utilisateur.

Permettre le partage des connaissances relatives aux produits et à leurs modes de défaillances : Les données relatives aux produits sont exprimées sous forme de systèmes. La réutilisation d'un modèle de composant nous paraît ainsi simplifiée par rapport à CPAO pour lequel les fonctions attribuées étaient dépendantes d'une étude donnée. Les fonctions font maintenant partie intégrante des modèles de composants et sont exprimées en des termes plus génériques que sous CPAO. La bonne réutilisation implique néanmoins que les informations soient contextualisées.

Être applicable à l'ensemble des familles de produit du bâtiment : Notre approche, en s'appuyant sur des travaux existants, permet une description des principaux phénomènes entrant en jeu dans le bâtiment. Nous avons vu que du point de vue de la simulation fonctionnelle certains flux sont néanmoins mieux pris en compte que d'autres. Par ailleurs, tout mode de dégradation peut être décrit à partir du moment où il peut avoir une cible décrite en terme de type de composant ou de type de matériaux. Nous savons également que les fonctionnalités de certains systèmes ne sont pas représentables (systèmes qui changent de configuration, d'un point de vue topologique ou uniquement fonctionnel) : tous les systèmes doivent être représentés dans un mode de fonctionnement donné.

Comparaisons avec l'outil CPAO

Nous pouvons noter plusieurs améliorations par rapport à l'approche employée lors du développement de CPAO.

En premier lieu, la description fonctionnelle est plus simple à mettre en œuvre : il est possible de décrire les liaisons d'un composant à l'aide d'un ensemble de fonctions et de flux limité :

- Seuls cinq types de fonctions sont définies (*transporter, stopper, transformer, limiter, augmenter*), contre environ quatre-vingts sous CPAO ;
- Il est possible d'attribuer ces fonctions uniquement aux principaux types de flux : leurs flux enfants sont pris en compte lors de la phase de propagation.

Cela est rendu possible par la restructuration des items de la base de données d'agents environnementaux de CPAO autour du concept de flux, que nous avons développé au chapitre B.4.2, ainsi que par le choix d'un jeu de fonctions cohérent.

Le cadre de modélisation permet donc la construction de modèles simulables, dans le sens où il est possible de déterminer l'effet de la fonction d'un composant sur le reste du système par propagation des flux. Ce mécanisme permet également la mise à jour de modes de dégradations et, dans certains cas, d'enchaînements de dégradations complets.

Par ailleurs, une des ambitions du cadre de modélisation était de permettre la description de modèles de composants réutilisables d'une étude à l'autre. Ce point particulier n'a pu être véritablement évalué, faute de temps. Il nous semble cependant que l'approche que nous avons développée s'y prête :

- les descriptions fonctionnelles sont décrites uniquement au niveau composant ;
- il n'est pas fait référence aux fonctions des autres composants du système.

Dans ce contexte, la réutilisation d'un modèle de composant implique de vérifier qu'il se comporte de la manière voulue au sein du nouveau modèle. Il sera néanmoins nécessaire de le modifier si le nombre de ports est différent d'une étude à l'autre.

Conclusions générales et perspectives

La généralisation des méthodes d'analyse des défaillances aux produits de construction passe par le développement d'outils destinés à les faciliter et à les rendre accessibles. Partant de ce constat, nos travaux ont conduit au développement d'un cadre de modélisation des produits de construction visant à permettre d'automatiser une partie des études tout en conservant une description simple des produits. Les éléments de ce cadre de modélisation ont ensuite été implémentés au sein d'un prototype d'outil dont les fonctionnalités ont été évaluées. Une étude nous a permis de montrer le caractère fonctionnel de cet outil ainsi que certaines limites pour lesquelles nous avons proposé des éléments de solution.

Ainsi, la mise à jour des enchaînements de dégradations repose essentiellement sur la propagation des flux. Or, nous avons vu que cette approche présente des limites qui dépendront du niveau de description du système ainsi que des flux impliqués. Mieux cerner les possibilités et limites du cadre de modélisation implique la réalisation d'études complémentaires à celles déjà effectuées. Ces études devront porter sur des systèmes différents de celui déjà étudié. Les deux études complémentaires réalisées lors du projet DUREEE (Hans, 2007b) qui ont pour objet un bloc fenêtre encastré et un système de ventilation constituent à nos yeux un point de départ intéressant. Bien qu'étant moins détaillées que celles portant sur le module photovoltaïque, elles ont été correctement documentées et validées par des experts produits.

Il est néanmoins évident que quelles que soient les études effectuées et les modifications apportées au cadre de modélisation et à l'outil, des mécanismes offrant plus de contrôle à l'utilisateur sur le déroulement des études sont à développer. Nous savons par exemple qu'un seul état de fonctionnement est modélisable (cf. chapitre B.3.2) ce qui fait que seuls les modes de dégradations de l'état modélisé peuvent être mis à jour de manière automatisée. La prise en compte des autres modes de dégradations devrait pouvoir être effectuée directement par l'utilisateur par ajout sur les graphes constitués de manière automatisée.

Le mode de construction des graphes d'état pourrait également bénéficier de plusieurs améliorations. La première – et certainement la plus simple à implémenter – consiste à regrouper les modes de dégradations ayant des effets

similaires de manière à former un même nœud du graphe. En poussant plus loin ce raisonnement, et en considérant non plus les modes de dégradation mais les états des systèmes, il est certainement possible de réduire considérablement la taille du graphe en fusionnant les états similaires.

L'ajout d'un calcul de criticité permettant de hiérarchiser les scénarii de dégradation est également une évolution majeure à considérer. Comme évoqué au chapitre A.1.3.2, Talon (talon, 2006) proposait d'intégrer des paramètres temporels - probabilité d'apparition d'un mode de dégradation, temps de réalisation des effets, etc. - ainsi que la gravité, pour réaliser ces calculs. L'intégration d'un calcul de criticité nécessite la prise en compte de données quantitatives ce qui implique de nombreuses modifications du cadre de modélisation ainsi que de l'outil. Il faut dans un premier temps identifier une méthode de calcul permettant d'intégrer les différents types de données qui seront disponibles. Par ailleurs, certains types d'événements sont par nature difficiles à quantifier. Si les travaux de Talon (Talon, 2006) constituent un point de départ évident, il pourrait être utile d'envisager en parallèle d'autres voies, en se basant, par exemple, sur des approches de type méthodes de Monte Carlo.

Bibliographie

- (Bell, 2006)** Bell J. Interpretation of simulation for model-based design analysis of engineered systems. Mémoire de thèse de doctorat. University Of Wales, Aberystwyth, 2006.
- (Bell, 2007)** Bell J., Snooke N., et Price C. A language for functional interpretation of model based simulation. *Advanced Engineering Informatics*, Octobre 2007, vol. 21(4), P. 398-409.
- (Bredeweg, 2003)** Bredeweg B, et Struss P. Current topics in qualitative reasoning. *IA Magazine*, Winter issue, 2003, p. 13-16.
- (Bredeweg, 2006)** Bredeweg B., Liem J., Bouwer A., et Salles P. Curriculum for learning about QR modelling. Rapport de recherche - Project Deliverable Report D6.9.1 : NATURNET-REDIME Projet cofinancé par la commission Européenne. 2006, 103 p. Disponible en ligne à l'adresse : <http://staff.science.uva.nl/~bouwer/pdf/NNR/D6.9.1.pdf>. Dernier accès le 9 mai 2011.
- (Bredeweg, 2008)** Bredeweg B., Salles P., Bouwer A., Liem J., et Nuttle T. Towards a structured approach to building qualitative reasoning models and simulations. *Ecological Informatics*, 2008, vol. 3(1) p. 1-12.
- (Brown, 2002)** Brown R. P., et Greenwood J. H. *Practical guide to the assessment of the useful life of plastics*. Rapra Technology Limited, 2002.
- (Chandrasekaran, 1994)** Chandrasekaran B. Functional representation: a brief historical perspective. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*, 1994, vol. 8(2), p. 173.
- (Chittaro, 1999)** Chittaro L., et Ranon R. Diagnosis of multiple faults with flow-based functional models: the functional diagnosis with efforts and flows approach. *Reliability Engineering & System Safety*, Mai 1999, vol. 64(2), p. 137-150.
- (CSTB, 2009)** Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB). Plateforme collaborative Evaperfs (Logiciel). Disponible en ligne à l'adresse : <http://www.eva-perfs.fr/>. Dernier accès le 9 mai 2011.
- (Erden, 2008)** Erden M.S., Komoto H., Van Beek T.J., d'Amelio V., Echavarria E., et Tomiyama T. A review of function modeling: approaches and applications. *Artificial*

Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2008, vol. 22(02), p. 147-169.

(Fayolle, 2005) Fayolle B., et Verdu J. Vieillissement physique des matériaux polymères. *Techniques de l'ingénieur* - Vol. COR108 - 2005.

(Forbus, 2008) Forbus K. D. Chapter 9 - Qualitative modeling. Dans *Handbook of knowledge representation - Foundation of artificial intelligence* – Vol. 3: p. 361-393. Elsevier, 2008.

(Guérin, 1994) Guérin B. Polyamides PA - *Techniques de l'ingénieur* – Vol. A3360 - 1994.

(Hans, 2007a) Hans J., Joffre C., Boilève C., et Fies B. FMEA software to enhance innovation in building. Dans *Proceedings of the CIB world building conference 2007*, Cape Town, South Africa, 2007.

(Hans, 2007b) Hans J., Morlot R., Collignan B., Boulanger X., et Proisy B. Durabilité des équipements énergétiques et composants d'enveloppe du bâtiment. Rapport de recherche ANR-ADEME. 2007.

(Hodve, 2004) Hovde J., et Moser K. Performance based methods for service life prediction - State of the art reports - Part A & Part B. CIB W080 / RILEM 175, Mars 2004.

(ISO, 2000) International Organization for Standardization. ISO 15686. Building and constructed assets – service life planning – Part 1 To 10. 2000.

(ISO, 2006) International Organization for Standardization. ISO 60812. Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). 2006.

(Jensen, 2009) Jensen D., Tumer I., et Kurtoglu T. Flow state logic (fsl) for analysis of failure propagation in early design. Dans *Proceedings Of The ASME 2009 International design engineering technical conferences & computers and information in engineering conference*, San Diego, USA, Septembre 2009.

(Jernberg, 2004) Jernberg P., Lacasse M. A., Haagenrud S., et Sjöström C. *Guide and bibliography to service life and durability research for building materials and components*. Joint CIB W80 / RILEM TC 140 – TSL Committee on service life of building materials and components. 2004. Vol. 295, 372 p.

(Josephson, 1994) Josephson J., et Chandrasekaran B. Representing function as effect - Chandrasekara & Josephson. Dans *Proceedings Of the functional modeling workshop*, Paris, France, 1994.

- (Kitamura, 2003)** Kitamura Y., et Mizoguchi R. Ontology-based description of functional design knowledge and its use in a functional way server. *Expert Systems With Applications*, Février 2003, vol. 24(2), p. 153-166.
- (Kumar, 1995)** Kumar A. Component ontological representation of function for candidate discrimination in model based diagnosis. Mémoire de thèse de doctorat. State University Of New York At Buffalo, Buffalo, 1995.
- (Lacasse, 2008)** Lacasse M. A., Brian K., Talon A., Boissier D., Hilly T., et Abdulghani K. Optimization of the building maintenance management process using a markovian model. Dans *11DBMC International conference on durability of building materials and components*, Istanbul, Turkey, Mai 2008.
- (Lair, 2000a)** Lair J. Évaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. Mémoire de thèse de doctorat. Université Blaise Pascal Clermont II, Clermont Ferrand, 2000.
- (Lair, 2000b)** Lair J., et Le Teno J-F. Building components service life modelling with qualitative simulation. Dans *Proceedings of the International RILEM/CIB/ISO symposium on integrated life cycle design of materials and structures*, Helsinki, Finland, 2000.
- (Lounis, 1998)** Lounis Z, Vanier D. J., et Lacasse M. A. A discrete stochastic model for performance prediction of roofing systems. Dans *Proceedings off the CIB worl building congress « Construction and the environment »*, Gävle, Sweden, Juin 1998.
- (Mc Duling, 2006)** Mc Duling J. Towards the development of transition probability matrices in the markovian model for the predicted service life of buildings. Mémoire de thèse de doctorat. University of Pretoria, Pretoria, 2006.
- (Mc Duling, 2008)** Mc Duling J., Horak E., et Cloete C. Service life prediction beyond the 'factor method'. Dans *11DBMC International conference on durability of building materials and components*, Istanbul, Turkey, Mai 2008.
- (Morcoux, 2005)** Morcoux G., et Lounis Z. Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms. *Automation In Construction*, Janvier 2005, vol. 14(1), p. 129-142.

- (Offenstein, 1988)** Offenstein F. *Compatibles, incompatibles: ou comment associer les matériaux de construction*. Éditions du Moniteur. Paris, 1988, 223 p.
- (Pahl, 2007)** Pahl G., Wallace K., et Blessing L. *Engineering design: a systematic approach*. Springer, 2007, 629 p.
- (Pfaendner, 2006)** Pfaendner R. How will additives shape the future of plastics. *Polymer Degradation And Stability*, Septembre 2006, 91 (9), p. 2249-2256.
- (Price, 1998)** Price C. J. Function-directed electrical design analysis. *Artificial Intelligence In Engineering*, 1998, vol. 12(4), p. 445-456.
- (Price, 1997)** Price C. J, Snooke N., Pugh D. R, Hunt J. E, et Wilson M. S. Combining functional and structural reasoning for safety analysis of electrical designs. *The Knowledge Engineering Review*, 1997, vol.12(03), p. 271-287.
- (Stone, 2000)** Stone R., et Wood K. L. Development of a functional basis for design. *Journal Of Mechanical Design*, 2000, vol. 122(4), p. 359-370.
- (Struss, 2008)** Struss P. Chapter 10 - Model-based problem solving. Dans *Handbook of knowledge representation - Foundation of artificial intelligence* – Vol. 3. p. 395-465. Elsevier, 2008.
- (Struss, 2003)** Struss P., et Price C. Model-based systems in the automotive industrie. *AI Magazine*, 2003.
- (Talon, 2006)** Talon A. Évaluation des scénarii de dégradation des produits de construction. Mémoire de thèse de doctorat. Université Blaise Pascal clermont II, Clermont Ferrand, 2006.
- (Talon, 2007)** Talon A., Boissier D., et Hans J. Durée de vie des produits de construction. Dans *Actes des XXVème rencontres universitaires de génie civil*, Bordeaux, 2007.
- (Talon, 2005)** Talon A., Hans J., et Chevalier J-L. *State of the art report on failure modes effects and criticality analysis research for and application to the building domain*. Joint CIB W80 / RILEM TC 140 – TSL committee on service life of building materials and components. 2005.
- (Teoh, 2004)** Teoh P. C., et Case K. Modelling and reasoning for failure modes and effects analysis generation. *Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218 (part B), p. 289-300.

- (van Paassen, 1999)** van Paassen M. M., et Wieringa P. Reasoning with multilevel flow models. *Reliability Engineering & System Safety*, Mai 1999, 64 (2), p. 151-165.
- (Whelan, 1994)** Whelan T. *Polymer technology dictionary*. Chapman & Hall, London, Première édition, 1994.
- (Wirth, 1996)** Wirth R., Berthold B., Krämer A., et Peter G. Knowledge-based support of system analysis for the analysis of failure modes and effects. *Engineering Applications Of Artificial Intelligence*, Juin 1996, vol. 9(3), p. 219-229.
- (Wright, 2001)** Wright D. *Failure of plastics and rubber products: causes, effects, and case studies involving degradation*. William Andrew, 2001, 416 p.
- (Zhang, 2005)** Zhang Y., Augenbroe Godfried, et Vidakovic Brani. Uncertainty analysis in using markov chain model to predict life cycle performance. Dans *Proceedings of 10DBMC international conference on durability of building materials and components*, Lyon, 2005.

Annexes

Annexe 1 : Représentation d'une famille de flux

Cette étude a pour objectif d'étudier la présentation des phénomènes liés à la propagation de sollicitations mécaniques dans un système, comme la prise en compte d'une force exercée par le poids d'un composant ou d'une contrainte environnementale de nature mécanique.

Remarque liminaire :

Le formalisme utilisé (fonction/flux) est un formalisme énergétique adapté à la représentation des systèmes dynamiques. Le flux d'énergie mécanique utilisé par Hirtz¹⁶ est par exemple défini comme le travail des forces en présence. Dans ce contexte, la représentation directe de la mécanique statique avec ce formalisme n'est pas possible.

Néanmoins, les phénomènes de défaillance de type mécanique (effondrement d'une structure, flambement, déformation, etc.) ne doivent pas être négligés. Comme pour les autres phénomènes, la mise à jour des modes de défaillance implique :

- De pouvoir exprimer un fonctionnement nominal (ou fonctionnement de référence).
- De pouvoir identifier une déviation de ce comportement (donc une défaillance potentielle).

À la différence des autres types de modes de dégradation, ceux liés à la statique ont pour effet une modification de la topologie du système. Par conséquent, le modèle de composant du système cesse en général d'être valide dès qu'un tel mode de dégradation est appliqué. Dans le cadre d'une construction automatisée des graphes de défaillances, cela implique une terminaison de la branche.

Nous étudions ici la possibilité de « détourner » le formalisme fonction/flux de manière à intégrer une représentation de la statique, avec pour point de départ le

¹⁶ Hirtz J., Stone R.B., Mcadams D.A., Szykman S. & wood K.L., 2002 , 'A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Effort', *Research in Engineering Design*, Vol. 13, No. 2., pp. 65-82.

Annexe 1 : Représentation d'une famille de flux

fait qu'un flux de *contrainte mécanique statique* représente un effort exercé sur le système.

Dans ce cas, seules deux fonctions semblent utilisables :

- *Transporter* qui signifie que le composant subit une sollicitation et la transmet aux composants voisins.
- *Stopper* qui signifie que la sollicitation n'est pas transmise au composant voisin.

On distinguera plusieurs points :

1. La représentation de la sollicitation mécanique :

- Générée par les éléments du système (i.e. poids propre des composants) ;
- Générée par un des environnements.

2. La prise en compte de la sollicitation mécanique :

- Comme expression du fonctionnement nominal du système étudié (capacité d'un système non dégradé à supporter la contrainte) ;
- Cas d'une dégradation causant une sollicitation ;
- Cas d'une dégradation causant une fragilisation d'un composant vis-à-vis d'une sollicitation ;
- Cas d'une sollicitation causant une dégradation.

Ces différents points sont traités ci-dessous.

1. Représentation de la sollicitation

1.1. Influence du poids propre d'un composant

De manière générale, les systèmes décrits initialement sont considérés comme étant à l'équilibre et seules sont étudiées les influences externes (i.e. provenant des milieux). Cela se traduit, en début d'étude, par une absence de flux sur les ports du système qui ne sont pas en contact avec des milieux. Ce principe est applicable à l'ensemble des flux en incluant ceux d'énergie mécanique.

On considère donc implicitement qu'un système, dégradé ou non, supporte les contraintes qu'il génère lui-même. Il en découle qu'il n'est pas possible de faire

intervenir les charges générées par les composants eux-mêmes comme cause de défaillance.

Il est cependant possible de décrire une défaillance ayant pour cause une erreur de conception et permettant de décrire une « fragilité » d'un des éléments du système.

1.2. Influence provenant d'un milieu

Ces influences sont représentées par le flux d'énergie mécanique « charge statique » (constante dans le temps, par opposition à dynamique) ou par un de ses flux enfants.

Exemple 1 : charge de neige

Dans le cas de la neige, le pseudo-flux *neige* est relié par une relation de similitude au flux *charge statique due à la neige* (enfant du flux *charge statique*). L'inclusion pseudo-flux *neige* dans un milieu implique donc la présence du flux de charge statique correspondant.

Remarque : les sollicitations que représentent les flux ne sont pas quantifiées, néanmoins le nom du flux en lui-même fournit parfois une indication quant à son amplitude comme c'est le cas ici.

2. Prise en compte des sollicitations mécaniques

2.1. Sollicitation et fonctionnement nominal

Sous fonction : représenter le fonctionnement nominal en prenant en compte les sollicitations statiques provenant de l'environnement.

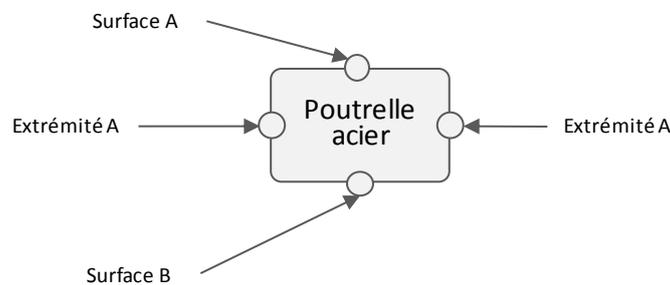
Les fonctions attribuées à un composant sont idéalement décrites de manière à ce que le modèle de composant soit réutilisable. Par exemple, le modèle d'un câble conducteur électrique présente une fonction *transporter* le flux d'énergie *courant électrique* d'une extrémité à l'autre du câble. Cette fonction décrit la capacité attribuée au composant à transporter le courant. La présence ou non du flux *courant électrique* traversant le composant sera précisée lors de l'utilisation du modèle de composant dans un système en contact avec des flux.

Annexe 1 : Représentation d'une famille de flux

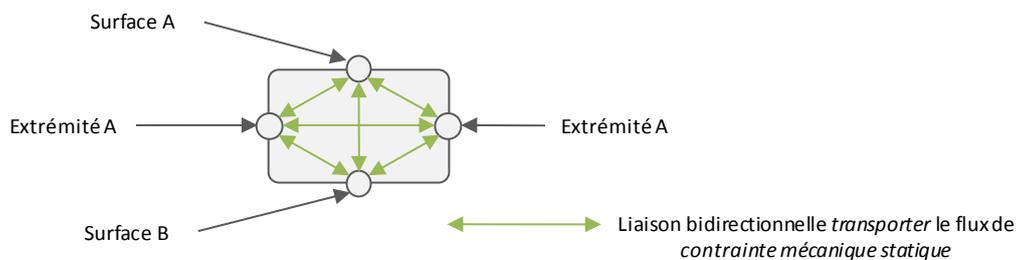
Ce principe est difficile à mettre en œuvre dans le cadre de la propagation des flux de *contrainte mécanique* car cette dernière dépend de la géométrie du système. Ce point est développé dans l'exemple ci-dessous.

Exemple 2 : Modèle de composant d'une poutrelle acier en I.

Prenons l'exemple du modèle de composant d'une poutrelle acier en I. Celle-ci peut être utilisée indifféremment en panne horizontale ou en poteau. Le modèle de composant comprend quatre ports décrivant les deux extrémités ainsi que des points ou surfaces situés le long de la poutre. L'environnement comprend une charge statique, qui est un effort de compression (le cas d'autres types d'effort sera traité ultérieurement).

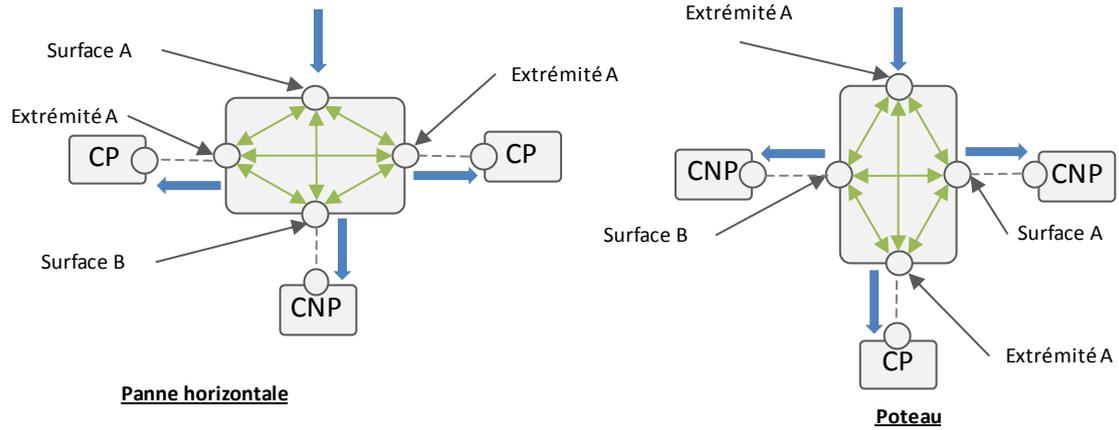


Le choix des fonctions pour décrire un modèle de composant réutilisable conduit à représenter le composant de la manière suivante :



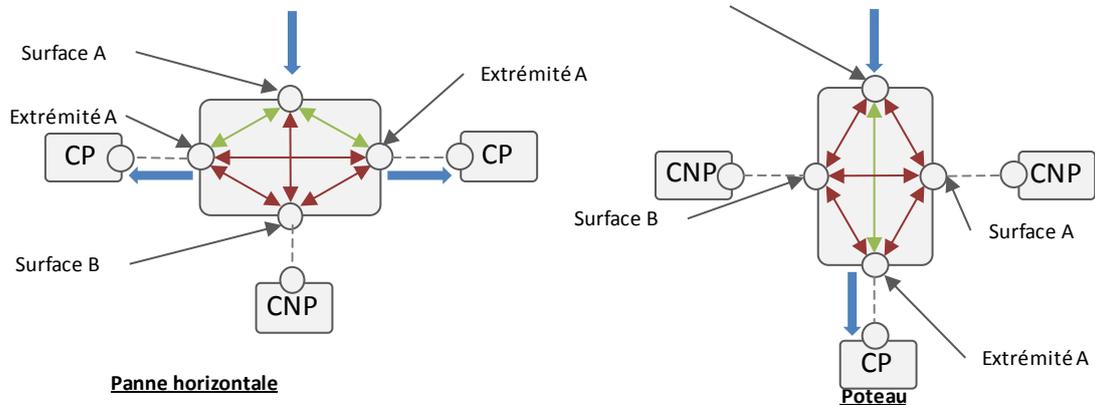
Autrement dit, chaque surface décrite est capable de transférer des charges vers les autres (et par conséquent les composants en contact, que ces derniers reprennent les charges ou non).

Lors de l'utilisation d'un tel modèle de composant en tant que panne horizontale ou en tant que poteau, on observe une divergence entre le comportement exprimé par le modèle et le comportement attendu :



Comportement exprimé

Comportement attendu



Légende

- Flux de contraintes mécaniques statiques
- Liaison bidirectionnelle transporter le flux de contrainte mécanique statique
- Liaison bidirectionnelle stopper le flux de contrainte mécanique statique
- CP Composant porteur
- CNP Composant non porteur

Dans les deux cas, des charges sont transférées vers des composants non porteurs (CNP sur la figure) qui en pratique ne sont pas sous contrainte. La solution semble être de constituer des modèles de composants différents adaptés à chaque cas (cf. partie inférieure de la figure).

Dans ce dernier cas, d'éventuels flux de sollicitations statiques provenant des CNP ne seront pas transmis aux autres éléments du système. Cela conduit à constater que ces modèles de composants permettent de représenter uniquement un comportement donné.

Il s'agit ici d'une limitation intrinsèque du cadre de modélisation. Le comportement d'un système d'un point de vue mécanique se détermine au niveau système en

Annexe 1 : Représentation d'une famille de flux

prenant en compte la géométrie, ce qu'il n'est pas possible de faire avec un modèle à base de composants.

Face à ce problème il est possible d'adopter deux approches :

- considérer que les contraintes se propagent systématiquement dans tous les composants (partie supérieure de la figure précédente).
- développer des modèles *ad hoc* permettant de représenter uniquement le comportement nominal (partie supérieure de la figure précédente).

Dans le premier cas, des modes de défaillance peuvent être causés par des flux qui ne devraient pas être présents (faux positifs), dans le second, certains composants ne sont pas en contact avec les contraintes alors qu'ils le devraient (non détection).

De plus, l'exemple développé ci-dessus ne prend en compte qu'un effort de compression et s'intéresse à sa propagation aux autres éléments du système. Or, sans plus de précision sur les autres éléments du système les contraintes subies par les composants voisins peuvent être de nature différente (i.e. traction, torsion, cisaillement ou flexion).

Sans rentrer dans les détails, il est évident que le cadre de modélisation ne permet pas de déterminer le type de sollicitation subie par un composant quelconque avec pour seule information la topologie décrite par les contacts entre composants. De plus différents types et niveaux de contraintes peuvent coexister au sein d'un même composant (p. ex. une partie en traction, une autre en flexion).

En d'autres termes, la propagation des flux ne peut fournir de résultats cohérents qu'au prix d'une modélisation *ad hoc* des composants et uniquement dans certains cas (p. ex. dans l'exemple 2). La modification des modèles de composants par les dégradations entraînent nécessairement des propagations de flux « fausses ». Les implications en termes de détection des dégradations sont décrites au point suivant.

2.2. Sollicitation causant une dégradation

Sous fonction : prendre en compte la défaillance d'un composant suite à une charge mécanique trop importante.

Il est possible de considérer qu'un flux de type mécanique est la cause d'une dégradation de la même manière que pour n'importe quel type de flux. La

dégradation est déclenchée dès que les causes et cibles concordent à un moment donnée de l'étude.

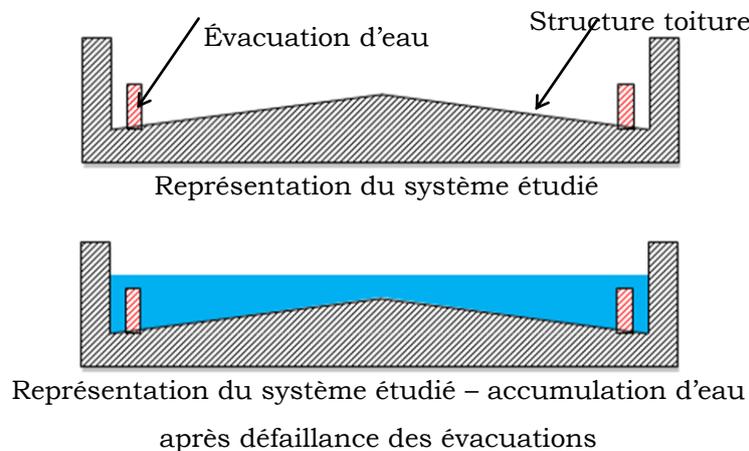
Or, il n'est pas possible de déterminer l'état de contrainte d'un composant dans un système (cf. point 2.1). Il n'est donc pas possible de décrire les conditions précises de déclenchement des modes de dégradation du type « rupture sous flexion » par exemple.

2.3. Dégradation causant une sollicitation

Sous fonction : représenter une sollicitation qui doit être prise en compte en cour d'étude (i.e. non présente initialement dans le milieu).

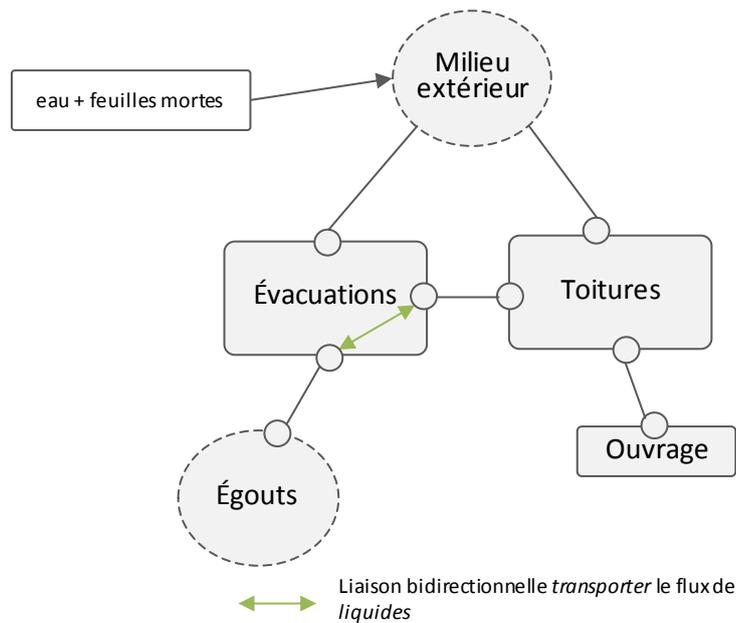
Exemple 3 : représentation d'une toiture-terrasse

Cet exemple concerne une toiture-terrasse ainsi qu'un système d'évacuation des eaux de pluie. Une stagnation d'eau se produira si les évacuations d'eau sont hors service.



Dans cet exemple, nous considérerons que les évacuations se bouchent à cause d'un dépôt de feuilles mortes qui empêche la circulation de l'eau. L'enjeu est donc de détecter la présence d'une contrainte mécanique due à une accumulation d'eau sur la toiture, ces contraintes pouvant conduire à la ruine de l'ouvrage.

Annexe 1 : Représentation d'une famille de flux



Il est possible de décrire un mode de dégradation générique « Bouchage des canalisations ». Cette dégradation a pour effet de modifier la fonction initiale *transporter* en une fonction *stopper* les liquides. Il n'est en revanche pas possible de représenter directement le phénomène d'accumulation d'eau sur la toiture ainsi que la sollicitation générée.

Deux limites du cadre de modélisation empêchent de représenter ce phénomène :

- l'absence de manière de représenter **l'accumulation** d'un flux dans le système.
- L'absence de relation causale entre la présence de l'eau et celle d'une contrainte mécanique.

Pour faire apparaître le risque de défaillance de la toiture, il existe néanmoins plusieurs possibilités :

- étudier le système à une échelle plus macroscopique. Il faut prendre en compte les évacuations et la toiture dans un même composant. Ainsi, en présence de feuilles mortes, ce composant sera défaillant et l'utilisateur sera informé que l'eau ne sera plus transportée vers les égouts.
- Inclure la défaillance du système à l'échelle du composant « évacuation ». Une solution est d'utiliser un composant évacuation qui serait plus spécifique. En créant un composant « Évacuation de toiture », il est possible de décrire une stagnation d'eau peut se constituer sur la toiture en cas de défaillance.

2.4. Dégradation causant une fragilisation d'un composant vis-à-vis d'une sollicitation.

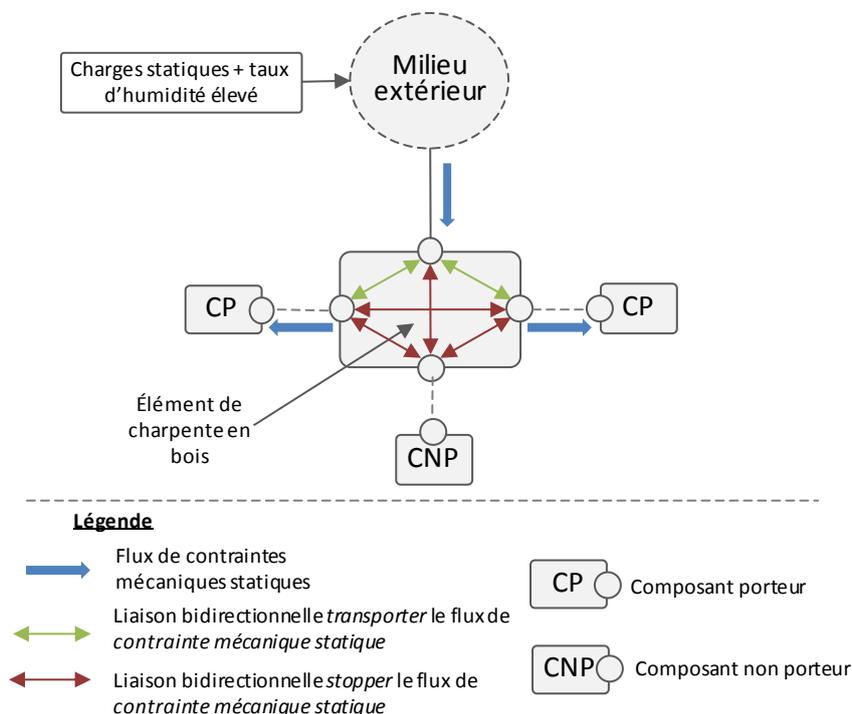
Sous fonction : prendre en compte la modification du comportement d'un composant vis-à-vis des charges mécaniques statiques.

Ce point vise à décrire la prise en compte des effets des modifications des composants sous l'effet de phénomènes de dégradation impactant leurs propriétés mécaniques (p. ex. corrosion des métaux, dégradation des bois par des champignons lignivores, etc.).

Il n'existe pas de moyen de préciser qu'un composant devient sensible à une dégradation à l'aide du formalisme fonction/flux. Ce type de description fait nécessairement appel à une relation entre dégradations. Cet aspect est discuté dans l'exemple suivant.

Exemple 4 : défaillance d'un élément de structure.

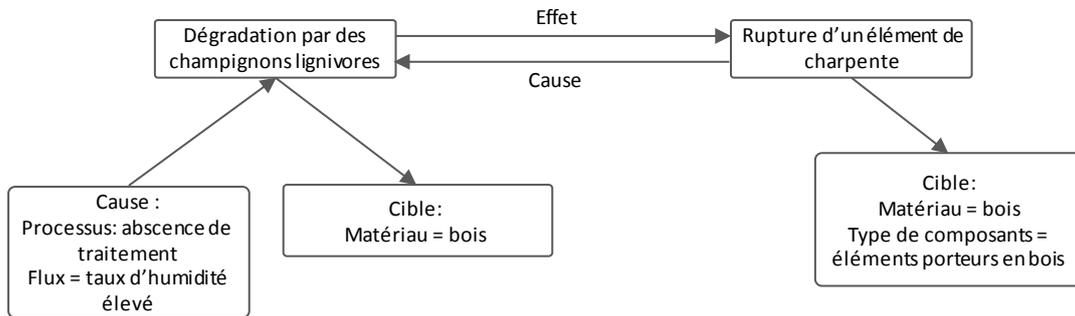
Considérons le cas décrit par le schéma ci-dessous. Un élément de structure (charpente bois) est soumis à un flux de *charges statiques*. Le modèle de composant utilisé est similaire à celui développé dans l'exemple 2.



Dans son état nominal, l'ensemble du système est considéré comme étant à l'équilibre (la charge est supportée sans rupture des éléments de structure). Nous considérons un phénomène de rupture de cet élément après attaque par des champignons lignivores qui entraînent la destruction du bois.

Annexe 1 : Représentation d'une famille de flux

La relation entre les phénomènes de dégradation peut être représentée de la façon suivante :



La solution pour mettre à jour le mode de dégradation est donc de considérer qu'il est causé directement par la dégradation précédente. Comme évoqué au point 1.1, les charges mécaniques provenant des éléments du système ne sont pas prises en compte comme cause de la dégradation *rupture*.

Annexe 2 : Logs de résultats : extraits des modes de dégradation du capteur photovoltaïque.

D: Fissuration du verre
C: Vitrage de protection
P: Milieu Extérieur (MExt)
Link(s) [2 modified]
"Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Effort mécanique = "" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Effort mécanique = Effort mécanique"".
"Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique = "" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique = Effort mécanique"".
P: EVA (EVA)
Link(s) [1 modified]
"EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique = "" modified into "EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique = Effort mécanique"".
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Joint silicone (JS)
Link(s) [1 added]
Link added: "Joint silicone (JS) -> EVA (EVA) : "Effort mécanique = Effort mécanique""
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
C: Joint silicone - capteur PV
P: Vitrage protection (VP)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: Milieu Extérieur (MExt)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: EVA (EVA)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: Cadre aluminium (CA)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: TPT (TPT)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
C: Cadre aluminium - capteur PV
P: Joint silicone (JS)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
C: EVA - capteur PV
P: Vitrage de protection (VP)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Joint silicone (JS)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: TPT (TPT)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
C: TPT - capteur PV
P: EVA (EVA)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: Joint silicone (JS)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: Milieu Extérieur (MExt)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
P: Boite de jonction (BJ)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
C: Boite de jonction - capteur PV
P: TPT (TPT)
New flow(s) [1]
Charge mécanique (neige)
D: Casse mécanique du verre
C: Vitrage de protection
P: Milieu Extérieur (MExt)
Link(s) [6 modified]
"Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Matière = "" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Matière = Matière"".
"Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Effort mécanique = Effort mécanique"" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Energie = Energie"".
"Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Rayonnement = Rayonnement"" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> EVA (EVA) : "Energie = Energie"".
"Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Matière = "" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Matière = Matière"".
"Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique = Effort mécanique"" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Energie = Energie"".
"Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Rayonnement = Rayonnement"" modified into "Milieu Extérieur (MExt) <-> Joint silicone (JS) : "Energie = Energie"".
P: EVA (EVA)
Link(s) [3 modified]
"EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Matière = "" modified into "EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Matière = Matière"".

Annexe 2 : Logs de résultats

"EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique = Effort mécanique"" modified into "EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Energie = Energie"".

"EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Rayonnement = Rayonnement"" modified into "EVA (EVA) <-> Joint silicone (JS) : "Energie = Energie"".

New flow(s) [27]
CO
Sulfure d'hydrogène
Ozone
Oxygène
Fientes de pigeon
Polluants atmosphériques Gazeux
Monoxyde de cabone
Humidité élevée
Humidité basse
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
Gaz rares
Particules aéropoortées
Particules inertes
PM10
PM2.5
Particules ultrafines
Cycle d'humidité*
Argon
Krypton
Particules fines
Flux thermique
Cycle gel/dégel
Choc thermique
Température élevée
Température basse
Cycle thermique

P: Joint silicone (JS)
Link(s) [1 modified]
"Joint silicone (JS) -> EVA (EVA) : "Effort mécanique = Effort mécanique"" modified into "Joint silicone (JS) -> EVA (EVA) : "Energie = Energie"".

New flow(s) [27]
CO
Sulfure d'hydrogène
Ozone
Oxygène
Fientes de pigeon
Polluants atmosphériques Gazeux
Monoxyde de cabone
Humidité élevée
Humidité basse
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
Gaz rares
Particules aéropoortées
Particules inertes
PM10
PM2.5
Particules ultrafines
Cycle d'humidité*
Argon
Krypton
Particules fines
Flux thermique
Cycle gel/dégel
Choc thermique
Température élevée
Température basse
Cycle thermique

C: Joint silicone - capteur PV
P: Vitrage protection (VP)
New flow(s) [27]
CO
Sulfure d'hydrogène
Ozone
Oxygène
Fientes de pigeon
Polluants atmosphériques Gazeux
Monoxyde de cabone
Humidité élevée
Humidité basse
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
Gaz rares
Particules aéropoortées
Particules inertes
PM10
PM2.5
Particules ultrafines
Cycle d'humidité*
Argon
Krypton
Particules fines
Flux thermique
Cycle gel/dégel
Choc thermique
Température élevée
Température basse
Cycle thermique

C: EVA - capteur PV
P: Vitrage de protection (VP)
New flow(s) [27]
CO
Sulfure d'hydrogène
Ozone

Oxygène
 Fientes de pigeon
 Polluants atmosphériques Gazeux
 Monoxyde de carbone
 Humidité élevée
 Humidité basse
 Eau de pluie (pluie acide)
 Eau de pluie
 Gaz rares
 Particules aéroportées
 Particules inertes
 PM10
 PM2.5
 Particules ultrafines
 Cycle d'humidité*
 Argon
 Krypton
 Particules fines
 Flux thermique
 Cycle gel/dégel
 Choc thermique
 Température élevée
 Température basse
 Cycle thermique

D: Pyrolyse des thermodurcissables
 C: Cellule PV
 P: EVA (EVA)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

C: Joint silicone - capteur PV
 P: EVA (EVA)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

C: EVA - capteur PV
 P: Vitrage de protection (VP)
 Link(s) [7 added, 6 modified]
 "Vitrage de protection (VP) <-> Joint silicone (JS) : "Rayonnement = Rayonnement"": effect reinforced by the degradation.
 "Vitrage de protection (VP) <-> TPT (TPT) : "Rayonnement = Rayonnement"": effect reinforced by the degradation.
 "Vitrage de protection (VP) <-> Câble de connexion + (CCnx+) : "Rayonnement = Rayonnement"": effect reinforced by the degradation.
 "Vitrage de protection (VP) <-> Câble de connexion - (CCnx-) : "Rayonnement = Rayonnement"": effect reinforced by the degradation.
 "Vitrage de protection (VP) <-> Kit de connexion (KCnx) : "Rayonnement = Rayonnement"": effect reinforced by the degradation.
 "Vitrage de protection (VP) <-> Protection silicone (PS) : "Rayonnement = Rayonnement"": effect reinforced by the degradation.
 Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Cellule PV (CPV) : "Solide = Solide"
 Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Joint silicone (JS) : "Solide = Solide"
 Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Kit de connexion (KCnx) : "Solide = Solide"
 Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion - (CCnx-) : "Solide = Solide"
 Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion + (CCnx+) : "Solide = Solide"
 Link added: "Vitrage de protection (VP) -> TPT (TPT) : "Solide = Solide"
 Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Protection silicone (PS) : "Solide = Solide"

P: Cellule PV (CPV)
 Link(s) [1 modified]
 "Cellule PV (CPV) <-> Vitrage de protection (VP) : "Rayonnement visible solaire = Rayonnement visible solaire" modified into "Cellule PV (CPV) <-> Vitrage de protection (VP) : "Rayonnement = Rayonnement"".
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

P: Joint silicone (JS)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

P: Kit de connexion (KCnx)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

P: Câble de connexion - (CCnx-)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

P: Câble de connexion + (CCnx+)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

P: TPT (TPT)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

P: Protection silicone (PS)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

C: TPT - capteur PV
 P: EVA (EVA)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

C: Câble de connexion +
 P: EVA (EVA)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

C: Câble de connexion -
 P: EVA (EVA)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

C: Kit de connexion - capteur PV
 P: EVA (EVA)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

C: Protection silicone
 P: EVA (EVA) (protection silicone)
 New flow(s) [1]
 Fientes de pigeon

D: Dégradations thermique des polymères (Thermo-oxydation des polymères)
 C: Cellule PV

Annexe 2 : Logs de résultats

P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: Joint silicone - capteur PV
P: Vitrage protection (VP)
Link(s) [4 added, 1 modified]
"Vitrage protection (VP) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort mécanique = Effort mécanique"" modified into
"Vitrage protection (VP) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort mécanique < Effort mécanique""
Link added: "Vitrage protection (VP) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage protection (VP) -> EVA (EVA) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage protection (VP) -> Cadre aluminium (CA) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage protection (VP) -> TPT (TPT) : "Liquides = Liquides""

P: Milieu Extérieur (MExt)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: Cadre aluminium (CA)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: TPT (TPT)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: Cadre aluminium - capteur PV
P: Joint silicone (JS)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: EVA - capteur PV
P: Vitrage de protection (VP)
Link(s) [7 added]
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Cellule PV (CPV) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Joint silicone (JS) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Kit de connexion (KCnx) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion - (CCnx-) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion + (CCnx+) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> TPT (TPT) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Protection silicone (PS) : "Liquides = Liquides""

P: Cellule PV (CPV)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: Joint silicone (JS)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: Kit de connexion (KCnx)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: Câble de connexion - (CCnx-)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: Câble de connexion + (CCnx+)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: TPT (TPT)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: Protection silicone (PS)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: TPT - capteur PV
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

P: Joint silicone (JS)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: Câble de connexion +
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: Câble de connexion -
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: Kit de connexion - capteur PV
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie

C: Protection silicone
P: EVA (EVA) (protection silicone)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)

Eau de pluie
D: Durcissement excessif des polymères
C: Cellule PV
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Kit de connexion (KCnx)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Câble de connexion (+) (CCnx+)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
C: Joint silicone - capteur PV
P: Vitrage protection (VP)
Link(s) [3 added, 1 modified]
"Vitrage protection (VP) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort mécanique < Effort mécanique": effect reinforced by the degradation.
Link added: "Vitrage protection (VP) -> EVA (EVA) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage protection (VP) -> Cadre aluminium (CA) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage protection (VP) -> TPT (TPT) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
C: EVA - capteur PV
P: Vitrage de protection (VP)
Link(s) [7 added]
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Cellule PV (CPV) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Kit de connexion (KCnx) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion - (CCnx-) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion + (CCnx+) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> TPT (TPT) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
Link added: "Vitrage de protection (VP) -> Protection silicone (PS) : "Effort mécanique < Effort mécanique"
P: Cellule PV (CPV)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Kit de connexion (KCnx)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Câble de connexion - (CCnx-)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Câble de connexion + (CCnx+)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Protection silicone (PS)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
C: Câble de connexion +
P: Cellule PV (CPV)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Protection silicone (PS)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
C: Câble de connexion -
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Protection silicone (PS)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
C: Kit de connexion - capteur PV
P: Cellule PV (CPV)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
P: EVA (EVA)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
C: Boite de jonction - capteur PV
P: Protection silicone (PS)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)
C: Protection silicone
P: EVA (EVA) (protection silicone)
New flow(s) [2]
Choc
Charge mécanique (neige)

Annexe 2 : Logs de résultats

```

P: Câble de connexion + (CCnx +) (protection silicone)
  New flow(s) [2]
    Choc
    Charge mécanique (neige)
P: Câble de connexion - (CCnx -) (protection silicone)
  New flow(s) [2]
    Choc
    Charge mécanique (neige)
P: Boite de jonction (BJ) (protection silicone)
  New flow(s) [2]
    Choc
    Charge mécanique (neige)
D: Photo-oxydation des polymères
C: Joint silicone - capteur PV
  P: Vitrage protection (VP)
    Link(s) [4 modified]
      "Vitrage protection (VP) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort mécanique < Effort mécanique"":
effect reinforced by the degradation.
      "Vitrage protection (VP) -> EVA (EVA) : "Effort mécanique < Effort mécanique"": effect
reinforced by the degradation.
      "Vitrage protection (VP) -> Cadre aluminium (CA) : "Effort mécanique < Effort mécanique"":
effect reinforced by the degradation.
      "Vitrage protection (VP) -> TPT (TPT) : "Effort mécanique < Effort mécanique"": effect
reinforced by the degradation.
C: EVA - capteur PV
  P: Vitrage de protection (VP)
    Link(s) [7 modified]
      "Vitrage de protection (VP) -> Cellule PV (CPV) : "Effort mécanique < Effort mécanique"": effect
reinforced by the degradation.
      "Vitrage de protection (VP) -> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique < Effort mécanique"":
      "Vitrage de protection (VP) -> Kit de connexion (KCnx) : "Effort mécanique < Effort
mécanique"": effect reinforced by the degradation.
      "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion - (CCnx-) : "Effort mécanique < Effort
mécanique"": effect reinforced by the degradation.
      "Vitrage de protection (VP) -> Câble de connexion + (CCnx+) : "Effort mécanique < Effort
mécanique"": effect reinforced by the degradation.
      "Vitrage de protection (VP) -> TPT (TPT) : "Effort mécanique < Effort mécanique"": effect
reinforced by the degradation.
      "Vitrage de protection (VP) -> Protection silicone (PS) : "Effort mécanique < Effort
mécanique"": effect reinforced by the degradation.
D: Irisation du verre
  C: Vitrage de protection
    P: Milieu Extérieur (MExt)
      Link(s) [2 added]
        Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> EVA (EVA) : " ""
        Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> Joint silicone (JS) : " ""
    P: EVA (EVA)
      Link(s) [2 added]
        Link added: "EVA (EVA) -> Milieu Extérieur (MExt) : " ""
        Link added: "EVA (EVA) -> Joint silicone (JS) : " ""
    P: Joint silicone (JS)
      Link(s) [2 added]
        Link added: "Joint silicone (JS) -> Milieu Extérieur (MExt) : " ""
        Link added: "Joint silicone (JS) -> EVA (EVA) : " ""
D: Corrosion chimique des métaux par eau
  C: Cellule PV
    P: Kit de connexion (KCnx)
      New flow(s) [2]
        Eau de pluie (pluie acide)
        Eau de pluie
    P: Câble de connexion (+) (CCnx+)
      New flow(s) [2]
        Eau de pluie (pluie acide)
        Eau de pluie
  C: Joint silicone - capteur PV
    P: Cadre aluminium (CA)
      New flow(s) [1]
        Eau
  C: Cadre aluminium - capteur PV
    P: Joint silicone (JS)
      Link(s) [2 added]
        Link added: "Joint silicone (JS) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Liquides =
Liquides""
        Link added: "Joint silicone (JS) -> Port libre (PL) : "Liquides = Liquides""
      New flow(s) [1]
        Eau
    P: Milieu Extérieur (MExt)
      Link(s) [2 added]
        Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> Joint silicone (JS) : "Liquides =
Liquides""
        Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> Port libre (PL) : "Liquides = Liquides""
      New flow(s) [1]
        Eau de pluie
    P: Port libre (PL)
      Link(s) [2 added]
        Link added: "Port libre (PL) -> Joint silicone (JS) : "Liquides = Liquides""
        Link added: "Port libre (PL) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Liquides = Liquides""
      New flow(s) [3]
        Eau de pluie (pluie acide)
        Eau de pluie
        Eau
  C: Câble de connexion +
    P: Cellule PV (CPV)
      Link(s) [4 added]
        Link added: "Cellule PV (CPV) -> Intérieur Boite de jonction (IntBJ) : "Liquides =
Liquides""
        Link added: "Cellule PV (CPV) -> Câble de connexion (-) (CCnx-) : "Liquides =
Liquides""
        Link added: "Cellule PV (CPV) -> EVA (EVA) : "Liquides = Liquides""

```

Link added: "Cellule PV (CPV) -> Protection silicone (PS) : "Liquides = Liquides""
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
P: Intérieur Boite de jonction (IntBJ)
Link(s) [4 added]
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> Cellule PV (CPV) : "Liquides =
Liquides""
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> Câble de connexion (-) (CCnx-
): "Effort mécanique < Effort mécanique""
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> EVA (EVA) : "Liquides =
Liquides""
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> Protection silicone (PS) :
Liquides = Liquides""
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
P: Câble de connexion (-) (CCnx-)
Link(s) [4 added, 1 modified]
"Câble de connexion (-) (CCnx-) <-> Intérieur Boite de jonction (IntBJ) :
"Liquides = "" modified into "Câble de connexion (-) (CCnx-) <-> Intérieur Boite de
jonction (IntBJ) : "Liquides = Liquides"".
Link added: "Câble de connexion (-) (CCnx-) -> Cellule PV (CPV) : "Liquides =
Liquides""
Link added: "Câble de connexion (-) (CCnx-) -> Intérieur Boite de jonction
(IntBJ) : "Effort mécanique < Effort mécanique""
Link added: "Câble de connexion (-) (CCnx-) -> EVA (EVA) : "Liquides =
Liquides""
Link added: "Câble de connexion (-) (CCnx-) -> Protection silicone (PS) :
Liquides = Liquides""
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
P: Protection silicone (PS)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
C: Câble de connexion -
P: Kit de connexion (KCnx)
Link(s) [4 added]
Link added: "Kit de connexion (KCnx) -> EVA (EVA) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Kit de connexion (KCnx) -> Intérieur Boite de jonction (IntBJ) :
Liquides = Liquides""
Link added: "Kit de connexion (KCnx) -> Câble de connexion (+) (CCnx+) :
Liquides = Liquides""
Link added: "Kit de connexion (KCnx) -> Protection silicone (PS) : "Liquides =
Liquides""
New flow(s) [4]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
Choc
Charge mécanique (neige)
P: Intérieur Boite de jonction (IntBJ)
Link(s) [4 added]
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> EVA (EVA) : "Liquides =
Liquides""
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> Kit de connexion (KCnx) :
Liquides = Liquides""
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> Câble de connexion (+)
(CCnx+) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Intérieur Boite de jonction (IntBJ) -> Protection silicone (PS) :
Liquides = Liquides""
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
P: Câble de connexion (+) (CCnx+)
Link(s) [4 added]
Link added: "Câble de connexion (+) (CCnx+) -> EVA (EVA) : "Liquides =
Liquides""
Link added: "Câble de connexion (+) (CCnx+) -> Kit de connexion (KCnx) :
Liquides = Liquides""
Link added: "Câble de connexion (+) (CCnx+) -> Intérieur Boite de jonction
(IntBJ) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Câble de connexion (+) (CCnx+) -> Protection silicone (PS) :
Liquides = Liquides""
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
P: Protection silicone (PS)
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
C: Kit de connexion - capteur PV
P: Cellule PV (CPV)
Link(s) [2 added, 1 modified]
"Cellule PV (CPV) <-> Câble de connexion (-) (CCnx-) : "Liquides = "" modified
into "Cellule PV (CPV) <-> Câble de connexion (-) (CCnx-) : "Liquides = Liquides"".
Link added: "Cellule PV (CPV) -> EVA (EVA) : "Liquides = Liquides""
Link added: "Cellule PV (CPV) -> Câble de connexion (-) (CCnx-) : "Effort
mécanique < Effort mécanique""
New flow(s) [2]
Eau de pluie (pluie acide)
Eau de pluie
P: EVA (EVA)
Link(s) [2 added]
Link added: "EVA (EVA) -> Cellule PV (CPV) : "Liquides = Liquides""
Link added: "EVA (EVA) -> Câble de connexion (-) (CCnx-) : "Liquides =
Liquides""
P: Câble de connexion (-) (CCnx-)
Link(s) [2 added]

Annexe 2 : Logs de résultats

```

mécanique < Effort mécanique""
Liquides""
Link added: "Câble de connexion (-) (CCnx-) -> Cellule PV (CPV) : "Effort
Link added: "Câble de connexion (-) (CCnx-) -> EVA (EVA) : "Liquides =
New flow(s) [4]
  Eau de pluie (pluie acide)
  Eau de pluie
  Choc
  Charge mécanique (neige)
C: Boite de jonction - capteur PV
P: Câble de connexion (+) (CCnx+)
  New flow(s) [2]
    Eau de pluie (pluie acide)
    Eau de pluie
P: Câble de connexion (-) (CCnx-)
  New flow(s) [2]
    Eau de pluie (pluie acide)
    Eau de pluie
P: Protection silicone (PS)
  New flow(s) [2]
    Eau de pluie (pluie acide)
    Eau de pluie
C: Protection silicone
P: Câble de connexion + (CCnx +) (protection silicone)
  New flow(s) [2]
    Eau de pluie (pluie acide)
    Eau de pluie
P: Câble de connexion - (CCnx -) (protection silicone)
  New flow(s) [2]
    Eau de pluie (pluie acide)
    Eau de pluie
P: Boite de jonction (BJ) (protection silicone)
  New flow(s) [2]
    Eau de pluie (pluie acide)
    Eau de pluie
D: Opacification du verre*
C: Vitrage de protection
P: Milieu Extérieur (MExt)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> EVA (EVA) : " ""
    Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> Joint silicone (JS) : " ""
P: EVA (EVA)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "EVA (EVA) -> Milieu Extérieur (MExt) : " ""
    Link added: "EVA (EVA) -> Joint silicone (JS) : " ""
P: Joint silicone (JS)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "Joint silicone (JS) -> Milieu Extérieur (MExt) : " ""
    Link added: "Joint silicone (JS) -> EVA (EVA) : " ""
D: Déformation du verre par charge
C: Vitrage de protection
P: Milieu Extérieur (MExt)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> EVA (EVA) : "Effort
    Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> Joint silicone (JS) : "Effort
P: EVA (EVA)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "EVA (EVA) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort
    Link added: "EVA (EVA) -> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique <
P: Joint silicone (JS)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "Joint silicone (JS) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort
    Link added: "Joint silicone (JS) -> EVA (EVA) : "Effort mécanique <
D: Déformation du verre par la chaleur
C: Vitrage de protection
P: Milieu Extérieur (MExt)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> EVA (EVA) : "Effort
    Link added: "Milieu Extérieur (MExt) -> Joint silicone (JS) : "Effort
P: EVA (EVA)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "EVA (EVA) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort
    Link added: "EVA (EVA) -> Joint silicone (JS) : "Effort mécanique <
P: Joint silicone (JS)
  Link(s) [2 added]
    Link added: "Joint silicone (JS) -> Milieu Extérieur (MExt) : "Effort
    Link added: "Joint silicone (JS) -> EVA (EVA) : "Effort mécanique <
mécanique < Effort mécanique""
mécanique < Effort mécanique""
Effort mécanique""

```

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Dégradations des matériaux

Dégradations spécifiques aux matériaux

Dégradations des céramiques

- Abrasion des céramiques
- Abrasion des céramiques par particules portées par un fluide
- Abrasion des céramiques par contrainte cyclique
- Abrasion des céramiques par particules aéroportées*
- Ecaillage des céramiques
- Thermoclase des céramiques
- Tressillage des céramiques

Dégradations des bois

- Fissuration du bois
- Boursouffure du bois collé*
- Cémentation du bois
- Décoloration par lixiviation du bois
- Dégradations des bois par des champignons lignivores
- Dégradations des bois par des insectes à larves xylophages
- Dégradations des bois par des termites
- Gonflement / retrait du bois

Dégradations des métaux

- Dégradation des métaux due au froid
- Tapure des métaux

Corrosion des métaux

- Corrosion bactérienne des métaux
- Corrosion chimique des métaux par eau
- Corrosion chimique des métaux par sulfure d'hydrogène
- Corrosion des métaux immergés
- Electro-corrosion des métaux

Dégradations des polymères

Dégradations spécifiques à certaines familles de polymères

- Vieillissement des polyamides en milieu extérieur.
- Vieillissement des polycarbonates en milieu extérieur.

Dégradations génériques des polymères

- Décoloration - perte de transparence des polymères
- Photo-oxydation des polymères
- Fissuration sous contraintes environnementales
- Dégradations thermique des polymères (Thermo-oxydation des polymères)
- Ramollissement des thermoplastiques et des élastomères

Fragilisation des polymères à basse température

- Fragilisation du polypropylène à basse température

Dégradations des peintures et vernis

- Cloquage de la peinture
- Craquelage de la peinture
- Décollement du revêtement
- Décoloration de la peinture
- Exfoliation du revêtement
- Farinage de la peinture

Dégradations des sols

- Tassement du sol

Dégradations des verres

Condensation sur le verre
Attaque chimique du verre
Irisation du verre
Délamination du verre feuilleté
Opacification du verre*

Casse du verre

Casse mécanique du verre
Casse thermique du verre
Déformation du verre par la chaleur
Déformation du verre par charge
Eclat/félure du verre
Fissuration du verre
Salissure du verre
Ternissure du verre

Dégradations des bétons

Alcali réaction du béton

Attaque par les chlorures du béton

Attaque du béton par les chlorures (liquides)
Attaque du béton par les chlorures (gaz)

Attaque sulfatique du béton

Attaque sulfatique du béton par des gaz issus de la pollution industrielle
Attaque sulfatique du béton par du sulfure d'hydrogène

Carbonatation du béton

Dégradations du béton armé

Carbonatation du béton armé
Géivité du béton
Lixiviation du béton

Dégradations des oxydes métalliques

Décollement des oxydes métalliques en couche mince

Dégradations - Incompatibilités matériaux

Incompatibilités avec la chaux

Incompatibilités des céramiques avec la chaux
Incompatibilités des verres avec la chaux
Incompatibilités du bitume avec la chaux
Incompatibilités des roches avec la chaux
Incompatibilités des granulats avec la chaux
Incompatibilités des bois avec la chaux
Incompatibilités des bois massifs avec la chaux
Incompatibilités du lamellé-collé avec la chaux
Incompatibilités du contre plaqué avec la chaux
Incompatibilités des polymères avec la chaux
Incompatibilités des thermodurcissables avec la chaux
Incompatibilités des thermoplastiques avec la chaux
Incompatibilités des élastomères avec la chaux
Incompatibilités des métaux ferreux avec la chaux
Incompatibilités de la fonte avec la chaux
Incompatibilités des aciers avec la chaux
Incompatibilités des aciers inoxydables avec la chaux

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Incompatibilités des métaux non ferreux avec la chaux

Incompatibilités de l'aluminium avec la chaux

Incompatibilités du cuivre avec la chaux

Incompatibilités du zinc avec la chaux

Incompatibilités avec le plâtre

Incompatibilités des céramiques avec le plâtre

Incompatibilités des verres avec le plâtre

Incompatibilités des bitumes avec le plâtre

Incompatibilités des roches avec le plâtre

Incompatibilités des pierres avec le plâtre

Incompatibilités des granulats avec le plâtre

Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec le plâtre

Incompatibilités des mortiers avec le plâtre

Incompatibilités des bétons avec le plâtre

Incompatibilités des métaux ferreux avec le plâtre

Incompatibilités de la fonte avec le plâtre

Incompatibilités des aciers avec le plâtre

Incompatibilités des aciers inoxydables avec le plâtre

Incompatibilités des polymères avec le plâtre

Incompatibilités des thermodurcissables avec le plâtre

Incompatibilités des thermoplastiques avec le plâtre

Incompatibilités des élastomères avec le plâtre

Incompatibilités des métaux non ferreux avec le plâtre

Incompatibilités de l'aluminium avec le plâtre

Incompatibilités du cuivre avec le plâtre

Incompatibilités du zinc avec le plâtre

Incompatibilités des bois avec le plâtre

Incompatibilités des bois massifs avec le plâtre

Incompatibilités du contre plaqué avec le plâtre

Incompatibilités du lamellé-collé avec le plâtre

Incompatibilités avec les céramiques

Incompatibilités de la chaux avec les céramiques

Incompatibilités des bitumes avec les céramiques

Incompatibilités des verres avec les céramiques

Incompatibilités des roches avec les céramiques

Incompatibilités des pierres avec les céramiques

Incompatibilités des granulats avec les céramiques

Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les céramiques

Incompatibilités des mortiers avec les céramiques

Incompatibilités des bétons avec les céramiques

Incompatibilités des métaux ferreux avec les céramiques

Incompatibilités de la fonte avec les céramiques

Incompatibilités des aciers avec les céramiques

Incompatibilités des aciers inoxydables avec les céramiques

Incompatibilités des polymères avec les céramiques

Incompatibilités des thermodurcissables avec les céramiques

Incompatibilités des thermoplastiques avec les céramiques

Incompatibilités des élastomères avec les céramiques

Incompatibilités des métaux non ferreux avec les céramiques

Incompatibilités du cuivre avec les céramiques

Incompatibilités du zinc avec les céramiques
Incompatibilités de l'aluminium avec les céramiques
Incompatibilités des bois avec les céramiques
Incompatibilités des bois massifs avec les céramiques
Incompatibilités du contre plaqué avec les céramiques
Incompatibilités du lamellé-collé avec les céramiques

Incompatibilités avec le verre

Incompatibilités des plâtres avec le verre
Incompatibilités de la chaux avec le verre
Incompatibilités des céramiques avec le verre
Incompatibilités des bitumes avec le verre
Incompatibilités des verres avec le verre
Incompatibilités des cartons avec le verre
Incompatibilités des roches avec le verre
Incompatibilités des pierres avec le verre
Incompatibilités des granulats avec le verre
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec le verre
Incompatibilités des mortiers avec le verre
Incompatibilités des bétons avec le verre
Incompatibilités des métaux ferreux avec le verre
Incompatibilités de la fonte avec le verre
Incompatibilités des aciers avec le verre
Incompatibilités des aciers inoxydables avec le verre
Incompatibilités des métaux non ferreux avec le verre
Incompatibilités du cuivre avec le verre
Incompatibilités du plomb avec le verre
Incompatibilités de l'aluminium avec le verre
Incompatibilités du zinc avec le verre
Incompatibilités des bois avec le verre
Incompatibilités des bois massifs avec le verre
Incompatibilités du contre plaqué avec le verre
Incompatibilités du lamellé-collé avec le verre
Incompatibilités des polymères avec le verre
Incompatibilités des thermodurcissables avec le verre
Incompatibilités des thermoplastiques avec le verre
Incompatibilités des élastomères avec le verre

Incompatibilités avec le bitume

Incompatibilités des roches avec le bitume
Incompatibilités des pierres avec le bitume
Incompatibilités des granulats avec le bitume
Incompatibilités du bitume avec le bitume
Incompatibilités des polymères avec le bitume
Incompatibilités des thermoplastiques avec le bitume
Incompatibilités des élastomères avec le bitume
Incompatibilités des verres avec le bitume

Incompatibilités avec les cartons

Incompatibilités de la chaux avec les cartons
Incompatibilités du verre avec les cartons
Incompatibilités des cartons avec les cartons
Incompatibilités du plâtre avec les cartons

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Incompatibilités des matériaux à base ciment avec les cartons
Incompatibilités des mortiers avec les cartons
Incompatibilités des bétons avec les cartons
Incompatibilités des roches avec les cartons
Incompatibilités des pierres avec les cartons
Incompatibilités des granulats avec les cartons
Incompatibilités des bois avec les cartons
Incompatibilités des bois massifs avec les cartons
Incompatibilités du contre plaqué avec les cartons
Incompatibilités des métaux ferreux avec les cartons
Incompatibilités de la fonte avec les cartons
Incompatibilités des aciers avec les cartons
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les cartons
Incompatibilités du cuivre avec les cartons

Incompatibilités avec les pierres

Incompatibilités de la chaux avec les pierres
Incompatibilités du verre avec les pierres
Incompatibilités du plâtre avec les pierres
Incompatibilités du bitume avec les pierres
Incompatibilités des matériaux à base ciment avec les pierres
Incompatibilités des mortiers avec les pierres
Incompatibilités des bétons avec les pierres
Incompatibilités des roches avec les pierres
Incompatibilités des pierres avec les pierres
Incompatibilités des granulats avec les pierres
Incompatibilités des bois avec les pierres
Incompatibilités des lamellés-collés avec les pierres
Incompatibilités des bois massifs avec les pierres
Incompatibilités des polymères avec les pierres
Incompatibilités des élastomères avec les pierres
Incompatibilités des thermoplastiques avec les pierres
Incompatibilités des thermodurcissables avec les pierres
Incompatibilités des métaux ferreux avec les pierres
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les pierres
Incompatibilités des aciers avec les pierres
Incompatibilités de la fonte avec les pierres
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les pierres
Incompatibilités de l'aluminium avec les pierres
Incompatibilités du zinc avec les pierres
Incompatibilités du cuivre avec les pierres

Incompatibilités avec les métaux non ferreux

Incompatibilités avec l'aluminium
Incompatibilités de la chaux avec l'aluminium
Incompatibilités des céramiques avec l'aluminium
Incompatibilités des bitumes avec l'aluminium
Incompatibilités des cartons avec l'aluminium
Incompatibilités des plâtres avec l'aluminium
Incompatibilités des roches avec l'aluminium
Incompatibilités des pierres avec l'aluminium
Incompatibilités des granulats avec l'aluminium

Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec l'aluminium
Incompatibilités des mortiers avec l'aluminium
Incompatibilités des bétons avec l'aluminium
Incompatibilités des métaux ferreux avec l'aluminium
Incompatibilités de la fonte avec l'aluminium
Incompatibilités des aciers avec l'aluminium
Incompatibilités des aciers inoxydables avec l'aluminium
Incompatibilités des polymères avec l'aluminium
Incompatibilités des thermodurcissables avec l'aluminium
Incompatibilités des thermoplastiques avec l'aluminium
Incompatibilités des élastomères avec l'aluminium
Incompatibilités des métaux non ferreux avec l'aluminium
Incompatibilités du cuivre avec l'aluminium
Incompatibilités du plomb avec l'aluminium
Incompatibilités de l'aluminium avec l'aluminium
Incompatibilités du zinc avec l'aluminium
Incompatibilités des bois avec l'aluminium
Incompatibilités des bois massifs avec l'aluminium
Incompatibilités du contre plaqué avec l'aluminium
Incompatibilités du lamellé-collé avec l'aluminium

Incompatibilités avec le cuivre

Incompatibilités de la chaux avec le cuivre
Incompatibilités des céramiques avec le cuivre
Incompatibilités des bitumes avec le cuivre
Incompatibilités des cartons avec le cuivre
Incompatibilités des plâtres avec le cuivre
Incompatibilités des roches avec le cuivre
Incompatibilités des pierres avec le cuivre
Incompatibilités des granulats avec le cuivre
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec le cuivre
Incompatibilités des mortiers avec le cuivre
Incompatibilités des bétons avec le cuivre
Incompatibilités des métaux ferreux avec le cuivre
Incompatibilités de la fonte avec le cuivre
Incompatibilités des aciers avec le cuivre
Incompatibilités des aciers inoxydables avec le cuivre
Incompatibilités des polymères avec le cuivre
Incompatibilités des thermodurcissables avec le cuivre
Incompatibilités des thermoplastiques avec le cuivre
Incompatibilités des élastomères avec le cuivre
Incompatibilités des métaux non ferreux avec le cuivre
Incompatibilités du plomb avec le cuivre
Incompatibilités de l'aluminium avec le cuivre
Incompatibilités du zinc avec le cuivre
Incompatibilités des bois avec le cuivre
Incompatibilités des bois massifs avec le cuivre
Incompatibilités du contre plaqué avec le cuivre
Incompatibilités du lamellé-collé avec le cuivre

Incompatibilités avec le zinc

Incompatibilités de la chaux avec le zinc

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Incompatibilités des céramiques avec le zinc
Incompatibilités des bitumes avec le zinc
Incompatibilités des cartons avec le zinc
Incompatibilités des plâtres avec le zinc
Incompatibilités des roches avec le zinc
Incompatibilités des pierres avec le zinc
Incompatibilités des granulats avec le zinc
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec le zinc
Incompatibilités des mortiers avec le zinc
Incompatibilités des bétons avec le zinc
Incompatibilités des métaux ferreux avec le zinc
Incompatibilités de la fonte avec le zinc
Incompatibilités des aciers avec le zinc
Incompatibilités des aciers inoxydables avec le zinc
Incompatibilités des polymères avec le zinc
Incompatibilités des thermodurcissables avec le zinc
Incompatibilités des thermoplastiques avec le zinc
Incompatibilités des élastomères avec le zinc
Incompatibilités des métaux non ferreux avec le zinc
Incompatibilités du cuivre avec le zinc
Incompatibilités du plomb avec le zinc
Incompatibilités de l'aluminium avec le zinc
Incompatibilités du zinc avec le zinc
Incompatibilités des bois avec le zinc
Incompatibilités des bois massifs avec le zinc
Incompatibilités du contre plaqué avec le zinc
Incompatibilités du lamellé-collé avec le zinc

Incompatibilités avec le plomb

Incompatibilités des bois avec le plomb
Incompatibilités du lamellé-collé avec le plomb
Incompatibilités du contre plaqué avec le plomb
Incompatibilités des bois massifs avec le plomb
Incompatibilités des métaux non ferreux avec le plomb
Incompatibilités du cuivre avec le plomb
Incompatibilités de l'aluminium avec le plomb
Incompatibilités du zinc avec le plomb
Incompatibilités des polymères avec le plomb
Incompatibilités des thermodurcissables avec le plomb
Incompatibilités des thermoplastiques avec le plomb
Incompatibilités des élastomères avec le plomb
Incompatibilités des roches avec le plomb
Incompatibilités des pierres avec le plomb
Incompatibilités des granulats avec le plomb
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec le plomb
Incompatibilités des mortiers avec le plomb
Incompatibilités des bétons avec le plomb
Incompatibilités des métaux ferreux avec le plomb
Incompatibilités de la fonte avec le plomb
Incompatibilités des aciers avec le plomb
Incompatibilités des aciers inoxydables avec le plomb

Incompatibilités de la chaux avec le plomb
Incompatibilités des céramiques avec le plomb
Incompatibilités des bitumes avec le plomb
Incompatibilités des cartons avec le plomb
Incompatibilités des plâtres avec le plomb

Incompatibilités avec les matériaux à base de ciment

Incompatibilités avec les mortiers
Incompatibilités des plâtres avec les mortiers
Incompatibilités des céramiques avec les mortiers
Incompatibilités des verres avec les mortiers
Incompatibilités du bitume avec les mortiers
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les mortiers
Incompatibilités des mortiers avec les mortiers
Incompatibilités des bétons avec les mortiers
Incompatibilités des roches avec les mortiers
Incompatibilités des pierres avec les mortiers
Incompatibilités des polymères avec les mortiers
Incompatibilités des thermodurcissables avec les mortiers
Incompatibilités des thermoplastiques avec les mortiers
Incompatibilités des élastomères avec les mortiers
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les mortiers
Incompatibilités de l'aluminium avec les mortiers
Incompatibilités du cuivre avec les mortiers
Incompatibilités du zinc avec les mortiers
Incompatibilités des bois avec les mortiers
Incompatibilités des bois massifs avec les mortiers
Incompatibilités du lamellé-collé avec les mortiers
Incompatibilités du contre plaqué avec les mortiers
Incompatibilités des métaux ferreux avec les mortiers
Incompatibilités de la fonte avec les mortiers
Incompatibilités des aciers avec les mortiers
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les mortiers

Incompatibilités avec les bétons

Incompatibilités des plâtres avec les bétons
Incompatibilités des céramiques avec les bétons
Incompatibilités des verres avec les bétons
Incompatibilités du bitume avec les bétons
Incompatibilité des matériaux à base de ciment avec les bétons
Incompatibilités des mortiers avec les bétons
Incompatibilités des bétons avec les bétons
Incompatibilité des roches avec les bétons
Incompatibilités des granulats avec les bétons
Incompatibilités des pierres avec les bétons
Incompatibilité des polymères avec les bétons
Incompatibilités des thermodurcissables avec les bétons
Incompatibilités des thermoplastiques avec les bétons
Incompatibilités des élastomères avec les bétons
Incompatibilité des métaux non ferreux avec les bétons
Incompatibilités de l'aluminium avec les bétons
Incompatibilités du cuivre avec les bétons

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Incompatibilités du zinc avec les bétons
Incompatibilités des bois avec les bétons
Incompatibilités des bois massifs avec les bétons
Incompatibilités du lamellé-collé avec les bétons
Incompatibilités du contre plaqué avec les bétons
Incompatibilités des métaux ferreux avec les bétons
Incompatibilités de la fonte avec les bétons
Incompatibilités des aciers avec les bétons
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les bétons

Incompatibilités avec les polymères

Incompatibilités avec les thermoplastiques
Incompatibilités de la chaux avec les thermoplastiques
Incompatibilités des bitumes avec les thermoplastiques
Incompatibilités des verres avec les thermoplastiques
Incompatibilités des plâtres avec les thermoplastiques
Incompatibilités des bois avec les thermoplastiques
Incompatibilités du lamellé-collé avec les thermoplastiques
Incompatibilités du contre plaqué avec les thermoplastiques
Incompatibilités des bois massifs avec les thermoplastiques
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les thermoplastiques
Incompatibilités du cuivre avec les thermoplastiques
Incompatibilités de l'aluminium avec les thermoplastiques
Incompatibilités du zinc avec les thermoplastiques
Incompatibilités du plomb avec les thermoplastiques
Incompatibilités des polymères avec les thermoplastiques
Incompatibilités des thermodurcissables avec les thermoplastiques
Incompatibilités des thermoplastiques avec les thermoplastiques
Incompatibilités des élastomères avec les thermoplastiques
Incompatibilités des roches avec les thermoplastiques
Incompatibilités des pierres avec les thermoplastiques
Incompatibilités des granulats avec les thermoplastiques
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les thermoplastiques
Incompatibilités des mortiers avec les thermoplastiques
Incompatibilités des bétons avec les thermoplastiques
Incompatibilités des métaux ferreux avec les thermoplastiques
Incompatibilités de la fonte avec les thermoplastiques
Incompatibilités des aciers avec les thermoplastiques
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les thermoplastiques

Incompatibilités avec les thermodurcissables

Incompatibilités de la chaux avec les thermodurcissables
Incompatibilités des bitumes avec les thermodurcissables
Incompatibilités des verres avec les thermodurcissables
Incompatibilités des polymères avec les thermodurcissables
Incompatibilités des thermodurcissables avec les thermodurcissables
Incompatibilités des thermoplastiques avec les thermodurcissables
Incompatibilités des élastomères avec les thermodurcissables
Incompatibilités des bois avec les thermodurcissables
Incompatibilités des bois massifs avec les thermodurcissables
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les thermodurcissables
Incompatibilités du cuivre avec les thermodurcissables

Incompatibilités de l'aluminium avec les thermodurcissables
Incompatibilités du zinc avec les thermodurcissables
Incompatibilités des roches avec les thermodurcissables
Incompatibilités des pierres avec les thermodurcissables
Incompatibilités des granulats avec les thermodurcissables
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les thermodurcissables
Incompatibilités des mortiers avec les thermodurcissables
Incompatibilités des bétons avec les thermodurcissables
Incompatibilités des métaux ferreux avec les thermodurcissables
Incompatibilités de la fonte avec les thermodurcissables
Incompatibilités des aciers avec les thermodurcissables
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les thermodurcissables

Incompatibilités avec les élastomères

Incompatibilités de la chaux avec les élastomères
Incompatibilités des bitumes avec les élastomères
Incompatibilités des verres avec les élastomères
Incompatibilités des plâtres avec les élastomères
Incompatibilités des bois avec les élastomères
Incompatibilités du lamellé-collé avec les élastomères
Incompatibilités du contre plaqué avec les élastomères
Incompatibilités des bois massifs avec les élastomères
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les élastomères
Incompatibilités du cuivre avec les élastomères
Incompatibilités de l'aluminium avec les élastomères
Incompatibilités du zinc avec les élastomères
Incompatibilités du plomb avec les élastomères
Incompatibilités des polymères avec les élastomères
Incompatibilités des thermodurcissables avec les élastomères
Incompatibilités des thermoplastiques avec les élastomères
Incompatibilités des élastomères avec les élastomères
Incompatibilités des roches avec les élastomères
Incompatibilités des pierres avec les élastomères
Incompatibilités des granulats avec les élastomères
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les élastomères
Incompatibilités des mortiers avec les élastomères
Incompatibilités des bétons avec les élastomères
Incompatibilités des métaux ferreux avec les élastomères
Incompatibilités de la fonte avec les élastomères
Incompatibilités des aciers avec les élastomères
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les élastomères

Incompatibilités avec les matériaux à base de bois

Incompatibilités avec les lamellés-collés

Incompatibilités de la chaux avec le lamellé-collé
Incompatibilités du plâtre avec le lamellé-collé
Incompatibilités du verre avec le lamellé-collé
Incompatibilités du bitume avec le lamellé-collé
Incompatibilités des cartons avec le lamellé-collé
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec le lamellé-collé
Incompatibilités des mortiers avec le lamellé-collé
Incompatibilités des bétons avec le lamellé-collé

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Incompatibilités des roches avec le lamellé-collé
Incompatibilités des pierres avec le lamellé-collé
Incompatibilités des métaux ferreux avec le lamellé-collé
Incompatibilités de la fonte avec le lamellé-collé
Incompatibilités des aciers avec le lamellé-collé
Incompatibilités des aciers inoxydables avec le lamellé-collé
Incompatibilités des polymères avec le lamellé-collé
Incompatibilités des thermdurcissables avec le lamellé-collé
Incompatibilités des thermoplastiques avec le lamellé-collé
Incompatibilités des élastomères avec le lamellé-collé
Incompatibilités des métaux non ferreux avec le lamellé-collé
Incompatibilités de l'aluminium avec le lamellé-collé
Incompatibilités du cuivre avec le lamellé-collé
Incompatibilités du zinc avec le lamellé-collé
Incompatibilités des bois avec le lamellé-collé
Incompatibilités des bois massifs avec le lamellé-collé
Incompatibilités du lamellé-collé avec le lamellé-collé
Incompatibilités du contre plaqué avec le lamellé-collé

Incompatibilités avec le contre plaqué

Incompatibilités de la chaux avec le contre plaqué
Incompatibilités du plâtre avec le contre plaqué
Incompatibilités du verre avec le contre plaqué
Incompatibilités du bitume avec le contre plaqué
Incompatibilités des cartons avec le contre plaqué
Incompatibilités des roches avec le contre plaqué
Incompatibilités des pierres avec le contre plaqué
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec le contre plaqué
Incompatibilités des mortiers avec le contre plaqué
Incompatibilités des bétons avec le contre plaqué
Incompatibilités des métaux ferreux avec le contre plaqué
Incompatibilités de la fonte avec le contre plaqué
Incompatibilités des aciers avec le contre plaqué
Incompatibilités des aciers inoxydables avec le contre plaqué
Incompatibilités des polymères avec le contre plaqué
Incompatibilités des thermdurcissables avec le contre plaqué
Incompatibilités des thermoplastiques avec le contre plaqué
Incompatibilités des élastomères avec le contre plaqué
Incompatibilités des métaux non ferreux avec le contre plaqué
Incompatibilités de l'aluminium avec le contre plaqué
Incompatibilités du cuivre avec le contre plaqué
Incompatibilités du zinc avec le contre plaqué
Incompatibilités des bois avec le contre plaqué
Incompatibilités des bois massifs avec le contre plaqué
Incompatibilités du lamellé-collé avec le contre plaqué
Incompatibilités du contre plaqué avec le contre plaqué

Incompatibilités avec les bois massifs

Incompatibilités de la chaux avec les bois massifs
Incompatibilités des plâtres avec les bois massifs
Incompatibilités des verres avec les bois massifs
Incompatibilités des bitumes avec les bois massifs

Incompatibilités des cartons avec les bois massifs
Incompatibilités des roches avec les bois massifs
Incompatibilités des pierres avec les bois massifs
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les bois massifs
Incompatibilités des mortiers avec les bois massifs
Incompatibilités des bétons avec les bois massifs
Incompatibilités des métaux ferreux avec les bois massifs
Incompatibilités de la fonte avec les bois massifs
Incompatibilités des aciers avec les bois massifs
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les bois massifs
Incompatibilités des polymères avec les bois massifs
Incompatibilités des thermoplastiques avec les bois massifs
Incompatibilités des thermodurcissables avec les bois massifs
Incompatibilités des élastomères avec les bois massifs
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les bois massifs
Incompatibilités de l'aluminium avec les bois massifs
Incompatibilités du cuivre avec les bois massifs
Incompatibilités du zinc avec les bois massifs
Incompatibilités des bois avec les bois massifs
Incompatibilités des bois massifs avec les bois massifs
Incompatibilités des contre plaqué avec les bois massifs

Incompatibilités avec les métaux ferreux

Incompatibilités avec la fonte

Incompatibilités des plâtres avec la fonte
Incompatibilités de la chaux avec la fonte
Incompatibilités des céramiques avec la fonte
Incompatibilités des bitumes avec la fonte
Incompatibilités des cartons avec la fonte
Incompatibilités des roches avec la fonte
Incompatibilités des pierres avec la fonte
Incompatibilités des granulats avec la fonte
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec la fonte
Incompatibilités des mortiers avec la fonte
Incompatibilités des bétons avec la fonte
Incompatibilités des métaux ferreux avec la fonte
Incompatibilités de la fonte avec la fonte
Incompatibilités des aciers avec la fonte
Incompatibilités des aciers inoxydables avec la fonte
Incompatibilités des polymères avec la fonte
Incompatibilités des thermodurcissables avec la fonte
Incompatibilités des thermoplastiques avec la fonte
Incompatibilités des élastomères avec la fonte
Incompatibilités des métaux non ferreux avec la fonte
Incompatibilités du cuivre avec la fonte
Incompatibilités du plomb avec la fonte
Incompatibilités de l'aluminium avec la fonte
Incompatibilités du zinc avec la fonte
Incompatibilités des bois avec la fonte
Incompatibilités des bois massifs avec la fonte
Incompatibilités du contre plaqué avec la fonte

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Incompatibilités du lamellé-collé avec la fonte

Incompatibilités avec les aciers

Incompatibilités des plâtres avec les aciers
Incompatibilités de la chaux avec les aciers
Incompatibilités des céramiques avec les aciers
Incompatibilités des bitumes avec les aciers
Incompatibilités des cartons avec les aciers
Incompatibilités des roches avec les aciers
Incompatibilités des pierres avec les aciers
Incompatibilités des granulats avec les aciers
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les aciers
Incompatibilités des mortiers avec les aciers
Incompatibilités des bétons avec les aciers
Incompatibilités des métaux ferreux avec les aciers
Incompatibilités de la fonte avec les aciers
Incompatibilités des aciers avec les aciers
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les aciers
Incompatibilités des polymères avec les aciers
Incompatibilités des thermodurcissables avec les aciers
Incompatibilités des thermoplastiques avec les aciers
Incompatibilités des élastomères avec les aciers
Incompatibilités des métaux non ferreux avec les aciers
Incompatibilités du cuivre avec les aciers
Incompatibilités du plomb avec les aciers
Incompatibilités de l'aluminium avec les aciers
Incompatibilités du zinc avec les aciers
Incompatibilités des bois avec les aciers
Incompatibilités des bois massifs avec les aciers
Incompatibilités du contre plaqué avec les aciers
Incompatibilités du lamellé-collé avec les aciers

Incompatibilités avec les aciers inoxydables

Incompatibilités de la chaux avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des céramiques avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des bitumes avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des cartons avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des plâtres avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des roches avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des pierres avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des granulats avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des matériaux à base de ciment avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des mortiers avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des bétons avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des métaux ferreux avec les aciers inoxydables
Incompatibilités de la fonte avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des aciers avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des aciers inoxydables avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des polymères avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des thermodurcissables avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des thermoplastiques avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des élastomères avec les aciers inoxydables

Incompatibilités des métaux non ferreux avec les aciers inoxydables
Incompatibilités du cuivre avec les aciers inoxydables
Incompatibilités du plomb avec les aciers inoxydables
Incompatibilités de l'aluminium avec les aciers inoxydables
Incompatibilités du zinc avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des bois avec les aciers inoxydables
Incompatibilités des bois massifs avec les aciers inoxydables
Incompatibilités du contre plaqué avec les aciers inoxydables
Incompatibilités du lamellé-collé avec les aciers inoxydables

Dégradations des composants

Dégradations des réseaux électriques

Dégradations des boîtes de jonction

Mauvaise fermeture de la boîte de jonction
Mauvaise étanchéité de la boîte de jonction

Dysfonctionnements électriques

Dysfonctionnement électrique dû au sable
Dysfonctionnement électrique dû à l'eau
Dysfonctionnement électrique dû à l'humidité
Dysfonctionnement électrique dû au sulfure
Dysfonctionnement électrique dû au sel

Dégradations des câbles électriques

Câbles électriques dénudés par rongeurs
Ramollissement des câbles électriques

Dégradations des joints d'étanchéité

Compression du joint
Compression du joint - contrainte dynamique
Compression du joint - contrainte statique
Problème de continuité des joints d'étanchéité

Dégradations des composants propres aux capteurs PV

Dégradations de la connexion des cellules des capteurs PV
Discontinuité des soudures du kit de connexion des cellules

Dégradations du cadre des capteurs PV

Déchaussement de l'encadrement du capteur PV
Déchaussement de l'encadrement du capteur PV - contrainte dynamique
Déchaussement de l'encadrement du capteur PV - contrainte statique
Présence de liquides dans le cadre aluminium des capteurs PV

Dégradations du TPT des capteurs PV

Fragilisation du TPT
Fragilisation puis fissuration du TPT par les ultraviolets
Fragilisation puis fissuration du TPT par les cycles de gel
Dégradation de la transparence du TPT
Eraflures du TPT

Dégradations de l'enveloppe EVA pour capteur PV

Jaunissement de l'enveloppe EVA
Défaut de tirage au vide - EVA capteur PV
Défaut d'étanchéité - EVA capteur PV
Défaut de réticulation - EVA capteur PV

Dégradations des cellules PV des capteurs PV

Corrosion de cellules

Annexe 3 : liste des modes de dégradations

Hot spot des cellules PV

Effet Joule sur les cellules PV

Fissuration des cellules PV

Fissuration des cellules PV - contrainte dynamique

Fissuration des cellules PV - contrainte statique

Mauvaise jonction P-N des cellules PV

Dégradations des canalisations

Bouchage de la canalisation par feuilles mortes

Annexe 4 : liste des flux

Matière

Gaz et particules

Composants gazeux

Ammoniac (NH₃)

Azote

Chlorure - gaz

Composants de l'atmosphère

Composés organiques volatils (COV)

Acétaldéhyde

Acides nitriques

Acroléine

COV anthropiques

COV naturels

Décane

Formaldéhydes

Hexanal

Limonène

Méthane

Toluène

Undécane

Xylène

Dioxyde de carbone (CO₂)

Gaz issus de pollution industrielle

Gaz rares

Krypton

Argon

Monoxyde de carbone (CO)

Mycotoxines

Oxyde d'azote

Oxydes de soufre

Oxygène

Ozone

Polluants atmosphériques Gazeux

Radon

Sulfure d'hydrogène

Taux d'humidité

Cycle d'humidité

Humidité basse

Humidité élevée

Condensation

Particules aéroportées

Allergènes d'acariens en suspension dans l'air

Allergènes de chats et de chiens en suspension dans l'air

Autres fibres issues des isolants en laines minérales

Fibres d'amiantes

Fibres minérales artificielles

Fumée de cigarette

Hydrocarbures imbrûlés

Particules inertes

Particules issues des combustions incomplètes

Particules fines

Annexe 4 : liste des flux

Particules ultrafines

PM10

PM2.5

Poussières portées par le vent (vent de sable)

Pollens

Protoxyde d'azote

Convection thermique

Liquides

Antigel

Chlorure - liquide

Détergents liquides

Eau

Eau de mer

Eau de pluie

Eau de pluie (pluie acide)

Eau ruisselante

Essence

Huile et graisses

Hydrocarbures liquides

Hydroxyde d'ammonium (Ammoniaque)

Javel

Nettoyants ménagers et produits d'entretien

Nettoyant sol domestique

Particules portées par un fluide

Produits à base de soude

Solvants organiques

Solide

"Objet"

Animaux et agents associés

Vertébrés

Rongeurs

invertébré

Bactérie

Larves xylophages

Térébrants - Invertébrés marins

Crustacés xylophages

Tarets (mollusques xylophages)

Termites

Termites de bois sec

Termites de sols

Arbres et arbustes

Feuilles mortes

Lierre grimpant

Plantes

Végétaux

Particules

Oxydes métalliques

Oxydes de cuivre

Oxydes de fer

Energie

Champ magnétique

Courant Electrique

Courant continu / alternatif

Courant électrique alternatif

Courant électrique continu

Courants forts

Courants vagabonds

Effort mécanique

Choc

Contrainte cyclique

Effort dynamique

Effort dynamique dû au vent

Effort dynamique dû au vent (vent de sable)

Effort induit par une variation dimensionnelle (cyclique)

Effort statique

Charge mécanique (neige)

Effort mécanique provoqué par les racines d'arbres ou d'arbustes

Effort mécanique provoqué par les racines de lierre

Effort induit par une variation dimensionnelle (statique)

Bruits solidiens

Flux thermique

Choc thermique

Température basse

Température élevée

Cycle thermique

Cycle gel/dégel

Rayonnement

Infrarouge

Rayonnement visible

Rayonnement visible artificiel

Rayonnement visible solaire

Ultraviolet

Vibration acoustique

Bruits aériens

Nuisance sonore

Vibrations provoquées par une machine à laver

Pseudo flux

Agents réactifs

Agent basique

Agent oxydant

Agent radioactif

Agent réducteur

Agent acide

Autres rayonnements

Ondes radios

Rayonnement gamma

Microorganismes

Algues

Bactéries

Champignons

Champignons lignivores

Champignons lignivores destructeurs des bois en œuvre

Pourriture cubique brune

Coniophore des caves

Lenzite des clôtures

Mérule

Poria vaillant

Pourriture fibreuse blanche

Coriolus versicolor

Polypore des caves

Pourriture molle

Chaetomium globosum Kunze

Précipitations

Grêle

Annexe 4 : liste des flux

Choc (grêle)

Neige

Pluie

Pluie verglassante et grésil

Pluies acides

Vent

Nuisances sonores dues au vent

Vent de sable

Toxicité

Agents pathogènes ou toxiques pour l'homme

Annexe 5 : Proposition de signification des principaux types de liaisons.

Annexe 5 : Proposition de signification des principaux types de liaisons.

Principaux types de flux et exemples de sous types		Signification du flux	Fonction (sauf transformer)	Signification possible de la liaison (couple fonction-flux)	
Matière		Tous corps dans l'état gazeux, liquide ou solide.	Transporter	Déplacer ou permettre le déplacement de matière.	
			Stopper	Empêcher le déplacement de matière.	
			Limiter	Sans objet	
			Augmenter	Sans objet.	
	Gaz		Corps dans l'état gazeux et éléments « portés » par ces corps. Ex : Air.	Transporter	Déplacer ou permettre le déplacement de matière à l'état gazeux.
				Stopper	Empêcher le déplacement de gaz.
				Limiter	Limiter un débit
				Augmenter	Augmenter un débit
		Flux de convection thermique	Décrit les échanges thermiques faisant intervenir un gaz.	Transporter	Idem gaz
				Stopper	Idem gaz
				Limiter	Idem gaz
				Augmenter	Idem gaz
	Liquides		Corps dans l'état liquide et éléments « portés » par ces corps.	Transporter	Déplacer ou permettre le déplacement de matière à l'état liquide.
			Stopper	Empêcher le déplacement ou le transport de liquide.	
			Limiter	Limiter un débit de liquide.	
			Augmenter	Augmenter un débit de liquide.	

Principaux types de flux et exemples de sous types (suite)		Signification du flux		Fonction (sauf transformer)	Signification possible de la liaison (couple fonction-flux)
Matière (suite)	Solides		Corps dans l'état solide	Transporter	Déplacer ou permettre le déplacement d'un solide.
				Stopper	Empêcher le déplacement ou le transport de solide.
				Limiter	Sans objet
				Augmenter	Sans objet
		Objet	Corps dans l'état solide, hors milieux granulaires. Ex : feuille morte.	Transporter	Déplacer ou permettre le déplacement d'un objet.
				Stopper	Empêcher le déplacement ou le transport d'objet.
				Limiter	Sans objet
				Augmenter	Sans objet
		Particules	Corps dans l'état solide exclusivement à l'état granulaire.	Transporter	Déplacer ou permettre le déplacement de solides granulaires.
				Stopper	Empêcher le déplacement ou le transport de solides granulaires.
				Limiter	Limiter le flux de particules. Ambiguïté entre flux (qtt/temps et diamètre).
				Augmenter	Sans objet

Annexe 5 : Proposition de signification des principaux types de liaisons.

Principaux types de flux et exemples de sous types (suite)	Signification du flux	Fonction (sauf transformer)	Signification possible de la liaison (couple fonction-flux)		
Énergie			Toutes les fonctions	Pas de signification.	
	Mécanique			Transporter	Transmettre tous les efforts mécaniques sans diminution
				Stopper	Empêcher la transmission d'effort mécanique.
				Limiter	Sans objet
				Augmenter	Sans objet
		Contrainte statique	Contraintes auxquelles le système est soumis en continu. Ex : Charge induite par un plancher sur un mur porteur.	Transporter	Idem mécanique
				Stopper	Idem mécanique
				Limiter	Idem mécanique
				Augmenter	Idem mécanique
		Contrainte dynamique	Contraintes auxquelles le système est soumis de manière périodique ou cyclique. Ex : Charge induite par un système vibrant, par le vent sur une structure, etc.	Transporter	Idem mécanique
				Stopper	Idem mécanique
				Limiter	Idem mécanique
				Augmenter	Idem mécanique
		Choc mécanique	Contrainte mécanique soudaine et localisée. Remarque : contient une notion de temporalité.	Transporter	Idem mécanique
				Stopper	Idem mécanique
				Limiter	Idem mécanique
				Augmenter	Idem mécanique

Principaux types de flux et exemples de sous types (suite)		Signification du flux		Fonction (sauf transformer)	Signification possible de la liaison (couple fonction-flux)	
Énergie (suite)	Rayonnement			Toutes les fonctions	Pas de signification	
		Infrarouges	Rayonnement infrarouges	Transporter	Transparent au rayonnement IR.	
				Stopper	Opaque au rayonnement IR.	
				Limiter	Limite l'intensité du flux transmis.	
				Augmenter	Augmente l'intensité du flux transmis.	
		Rayonnement visible		Transporter	Transparent au rayonnement visible.	
				Stopper	Opaque au rayonnement visible.	
				Limiter	Limite l'intensité du rayonnement transmis.	
				Augmenter	Augmente l'intensité du rayonnement transmis.	
		Ultraviolets	Rayonnements ultraviolets.	Transporter	Transparents au rayonnement UV.	
				Stopper	Opaque au rayonnement UV.	
				Limiter	Limite l'intensité du rayonnement transmis.	
			Augmenter	Augmente l'intensité du rayonnement transmis.		
		Acoustique		Propagation des ondes sonores (leur composante énergétique).	Transporter	Transporter les vibrations acoustiques
					Stopper	Stopper les vibrations acoustiques.
					Limiter	Limiter l'intensité des vibrations.
					Augmenter	Augmenter l'intensité des vibrations.

Annexe 5 : Proposition de signification des principaux types de liaisons.

Principaux types de flux et exemples de sous types (suite)		Signification du flux		Fonction (sauf transformer)	Signification possible de la liaison (couple fonction-flux)
Énergie (suite)	Thermique		Décrit les échanges thermiques par conduction.	Transporter	Transporter l'énergie transmise par conduction thermique
				Stopper	Stopper l'énergie transmise par conduction thermique
				Limiter	Limiter l'énergie transmise par conduction thermique.
				Augmenter	Augmenter l'énergie transmise par conduction thermique.
	Électrique		Existence d'un courant électrique, continu ou alternatif.	Transporter	Transporter de l'énergie/ du courant électrique - typiquement le cas des composant en métal.
				Stopper	Empêcher le passage d'énergie/courant électrique.
				Limiter	Diminuer l'énergie transmise par conduction.
				Augmenter	Augmenter l'énergie transmise par conduction.
	Magnétique		Décrit un champ magnétique. Longueur d'onde supérieure à l'infrarouge (qui est pris en compte dans « rayonnement »). Comprend : ondes radio, micro-ondes, Wifi, téléphones portables, etc.	Transporter	Pas de perte d'énergie, d'atténuation du signal, de perte d'information.
				Stopper	Stopper complètement le flux.
				Limiter	Diminuer l'énergie transmise.
				Augmenter	Augmenter l'énergie transmise.

