



Apport de la maintenance prévisionnelle au paradigme de régénération industrielle

Laëtitia Diez

► To cite this version:

Laëtitia Diez. Apport de la maintenance prévisionnelle au paradigme de régénération industrielle. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT: 2017LORR0348. tel-01743854

HAL Id: tel-01743854

<https://theses.hal.science/tel-01743854>

Submitted on 26 Mar 2018

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Apport de la maintenance prévisionnelle au paradigme de régénération industrielle

THESE

présentée et soutenue publiquement le 20 décembre 2017

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(mention Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique)

par

Laëtitia DIEZ

Composition du jury :

Président :

Eric BONJOUR, Professeur, ERPI, Université de Lorraine

Rapporteurs :

François PERES, Professeur, ENIT-LGP, INP-Toulouse

Dimitris KIRITSIS, Professeur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)

Examineurs :

Peggy ZWOLINSKI, Professeur, INP-GSCOP, Université de Grenoble

Eric LEVRAT, Professeur, CRAN, Université de Lorraine (Directeur de thèse)

Pascale MARANGE, Maître de Conférences, CRAN, Université de Lorraine (Co-directrice de thèse)



Remerciements

Etre doctorant est une aventure des plus fascinantes, où haut et bas se mêlent sans cesse, mais d'où l'on ressort forcément grandi tant sur le plan professionnel que sur le plan personnel. En tant cas, il en est ainsi pour moi. Ces trois années (plus quelques mois) m'ont permis de mener des réflexions sur un sujet qui me tient à cœur, et qui est primordial aujourd'hui, mais également sur moi-même. Mais l'ensemble de ces réflexions n'auraient pu avoir lieu sans les personnes qui m'ont entourée et soutenue durant cette aventure. C'est pourquoi je tiens à les remercier dans ce mémoire.

Pour cela, je commencerai par remercier le directeur du laboratoire du CRAN, Didier Wolf, ainsi que les directeurs du département ISET, Benoit Iung et André Thomas, pour m'avoir offert la possibilité de réaliser mes travaux de recherches au sein de leur équipe.

Je remercie très chaleureusement mes directeurs, Pascale Marangé et Eric Levrat, pour avoir assuré l'encadrement de cette thèse, et d'avoir cru en moi jusqu'au bout. Leurs compétences et leurs différents points de vue m'ont permis de mener à bien ce travail. Merci à Pascale pour sa disponibilité, pour m'avoir guidé dans chacune des étapes de cette thèse, et pour les nombreuses discussions que nous avons eu tant sur le plan professionnel que personnel. Merci à Eric pour sa patience, ses précieux conseils, et de m'avoir fait sortir de ma zone de confort, permettant à ce travail d'avancer et d'aboutir dans de bonnes conditions.

Je remercie, ensuite, les membres du jury, en commençant par François Pérès et Dimitris Kiritsis d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail, et pour la qualité de leur rapport, me permettant d'enrichir des points précis. Je remercie Peggy Zwolinski d'avoir accepté d'examiner les travaux présentés dans ce mémoire, et Eric Bonjour pour avoir accepté de présider ce jury. Leurs questions et remarques, lors de la soutenance, ont permis de mettre en avant certains points à approfondir et d'ouvrir de nouvelles perspectives.

Je tiens à remercier les personnes qui ont eu confiance en mes capacités et m'ont permis de faire de l'enseignement. C'est d'ailleurs, indirectement, grâce à ces enseignements que j'ai pu rencontrer mes collègues DCCE, que je remercie également, notamment Tatiana, Sarah, Anthéa, Apolline et Matthieu. Avec eux, les formations dispensées par le collège lorrain des écoles doctorales devenaient plaisantes.

Je remercie tous ceux que j'ai pu côtoyer durant mes trois années au sein du laboratoire du CRAN, et notamment, lors des pauses et des repas pris à la BSR. Je remercie en

particulier Dorine, Jérémie, Sara, Margaux, David, Alexis, Alexandre et Jérémy, pour ces bons moments passés ensemble. Parmi eux, certains sont devenus des amis très importants pour moi, et je les en remercie.

Je tiens également à remercier Christian, car, même si notre propre aventure s'est terminée avant celle de la thèse, il m'a toujours soutenu et accompagné dans mes choix, notamment professionnels, et ce, depuis notre rencontre.

Je remercie mes amis pour leur soutien indéfectible. Ils ont su, tous à leur manière, m'aider à garder le moral et le sourire, et à aller jusqu'au bout de cette aventure « thèse ». Alors Benjamin, Lauren, Andrée, Olivia, Hannah et Inès, je vous dis un grand merci, et en route pour de nouvelles aventures.a

Enfin, c'est avec amour que je remercie ma famille qui, malgré des choix étonnants pour eux, comme celui d'intégrer le monde de la recherche (monde qui leur était jusqu'alors inconnu), n'a cessé de m'accompagner, de me soutenir, de m'encourager afin que j'aille jusqu'au bout de ce que j'entreprends...

Ces remerciements ne seraient pas complets sans citer, un être qui m'est très cher, qui m'accompagne depuis près de 5 ans, qui sait m'apaiser et me faire sourire en toutes circonstances. Je parle, bien entendu, de ma petite boule de poils, mon petit chat : Tsuku.

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières	5
Liste des Figures	8
Liste des Tableaux.....	13
Glossaire	14
Abréviations	14
Introduction Générale.....	15
Chapitre 1 : Contexte et Problématique	19
I. Introduction.....	20
II. Economie Circulaire	22
1. Economie de Fonctionnalité	23
2. Biomimétisme	24
3. « Regenerative Design »	25
4. Ecologie Industrielle	26
5. « Cradle to Cradle » (C2C)	27
III. Prise en compte de l'économie circulaire tout au long du cycle de vie d'un produit : Etat de l'art.....	29
1. Conception - Ecoconception	29
2. Fabrication et Exploitation.....	36
3. Fin de Vie – Recyclage	38
IV. Bilan, Positionnement et Propositions	42
1. Bilans	42
2. Positionnement et Propositions.....	44
V. Conclusion.....	46
Chapitre 2 : Paradigme de Régénération	48
I. Introduction.....	49
II. De la régénération naturelle à la régénération industrielle (Contribution 1)	50
1. Régénération Naturelle	51
2. Régénération industrielle - Formalisation	53
3. Comment mettre en place la régénération ? – Expression du Besoin	69
III. Spécification du produit pour la régénération (Contribution 2)	74
1. Enrichissement du référentiel d'exigences produit.....	75
2. Exigences processus – exigences internes aux processus de régénération	79
IV. La maintenance, clé de voute de la régénération (Contribution 3)	81
1. Maintenance, apport à la régénération	82
2. Régénération : impact sur la maintenance	85

V.	Conclusion.....	87
Chapitre 3 : Aide à la décision pour la régénération industrielle.....		88
I.	Introduction.....	89
II.	Aide à la décision	89
1.	Point de vue des fournisseurs de produits_déchets	89
2.	Point de vue des régénérateurs	90
III.	Choix d'un modèle pour la modélisation du comportement d'un système complexe	92
1.	Critères retenus pour la modélisation.....	92
2.	Choix de la méthode de modélisation.....	93
IV.	System Dynamics.....	99
1.	Diagrammes de boucles causales	100
2.	Diagrammes de stocks et flux.....	101
3.	Mise en équations et simulations.....	102
V.	Modélisation de la régénération des produits_déchets – Patterns (Contribution 4)	103
1.	Modélisation du cycle de vie du produit	104
2.	Prise en compte des exigences produit	114
3.	Prise en compte des exigences processus	115
4.	Simulation et interprétation	116
VI.	Conclusion.....	117
Chapitre 4 : Applications		118
I.	Introduction.....	119
II.	Présentation de l'étude de cas	121
1.	Description de l'équipement étudié	121
2.	Expression des besoins et analyse des exigences des parties prenantes.....	126
3.	Politiques de régénération.....	134
III.	Evaluation des politiques de régénération.....	136
1.	Modélisation du comportement du lave-linge	137
2.	Prise en compte des exigences produit	145
3.	Prise en compte des exigences processus	146
IV.	Résultats et discussion	146
1.	Politique 1 - Scénario 1	148
2.	Comparaison Politique 1 et Politique 2.....	151
3.	Politique 3	155
V.	Conclusion – Perspectives	157
Conclusion Générale et Perspectives.....		160
Bibliographie.....		166
Annexes		180

Annexe – Chapitre 1.....	181
Annexe – Chapitre 3.....	182
Annexes – Chapitre 4.....	184

Liste des Figures

Figure 1.1 - Diagramme de Venn représentant les piliers du développement durable et les définitions associées à chaque terme – inspirée de « DevelopementDurable »	21
Figure 1.2 - Schéma de l'économie circulaire - Extraite et adaptée de (Foundation Ellen MacArthur, 2014).....	22
Figure 1.3 – Concept pour la prise en compte du développement durable et de l'économie circulaire selon la phase du cycle de vie du produit.....	29
Figure 2.4 - Réseau trophique et échanges de nutriments	51
Figure 2.5 - Exemple de transformation de nutriments au sein de la sphère naturelle...	52
Figure 2.6 - Exemple de transformation de produits au sein de la sphère technique.....	54
Figure 2.7 - Cycle industriel linéaire.....	54
Figure 2.8 - Cycle industriel circulaire : ajout des régénérateurs et des échanges de nutriments	57
Figure 2.9 - Cycle de vie et cycles d'utilisation	57
Figure 2.10 - Types de nutriments	59
Figure 2.11 - Régénérateur - Entrées/Sorties de produits	60
Figure 2.12 - Exemple de transformation de produits_déchets au sein de la sphère technique en tenant compte de la régénération	60
Figure 2.13 - Exemple de matrices de classification de l'état de santé du produit_déchet/nutriment.....	62
Figure 2.14 - Activités de processus de déconnexion	64
Figure 2.15 - Activités du processus de désassemblage.....	65
Figure 2.16 - Activités du processus de déstructuration	67
Figure 2.17 - Activités du processus de détechnification	67
Figure 2.18 - Succession des processus de régénération en cas de non capacités à régénérer le déchet	68
Figure 2.19 - Régénération multi-niveaux – Processus associés à chaque niveau du produit et échanges entre les différents niveaux (Diez et al., 2016),.....	68
Figure 2.20 - Ecosystème d'entreprises pour la régénération.....	70
Figure 2.21 - Mise en place de la régénération industrielle - Cas du flux poussé.....	70
Figure 2.22 - Exemple de flux poussé non viable pour le groupe PAPREC.....	71
Figure 2.23 - Exemple de flux poussé viable - exemple pour la société INDRA.....	72

Figure 2.24 - Questionnement sur la mise en place de la régénération industrielle - Cas du flux tiré.....	73
Figure 2.25 – Exigences produits considérées par les parties prenantes de la régénération	75
Figure 2.26 – Exigences produits considérées par les parties prenantes de la régénération avec prises en compte des régénérateurs comme parties prenantes du produit.....	77
Figure 2.27 – Catégories d'exigences considérées par les fonctions des régénérateurs	80
Figure 2.28 - "Concept of maintenance-centered circular manufacturing" - extraite de (Takata, 2013).....	82
Figure 2.29 - Extension du PHM au Prognostics for Health and Regeneration Management (depuis une figure issue de (Saxena, 2010)	83
Figure 2.30 – Impact de la mise en place d'une maintenance de régénération chez les utilisateurs sur les produits_déchets	84
Figure 3.31 - Représentation d'un automate hybride	94
Figure 3.32 - Exemple de réseaux bayésiens - Extrait de (Weber and Simon, 2015).....	95
Figure 3.33 – Représentation des interactions entre variables (Extrait de (Sterman, 2000))	96
Figure 3.34 – Représentation d'une variable stock et de ses deux flux (Extrait de (Sterman, 2000)).....	97
Figure 3.35 – Exemple de réseaux de neurones – Extrait de (Touzet, 1992)	97
Figure 3.36 – Représentation du délai sur une interaction entre variables	101
Figure 3.37 - Représentation des variables stock (a) et flux (b)	102
Figure 3.38 - Modélisation en boucles causales de la solution de régénération industrielle	104
Figure 3.39 – Etats dans lesquels peut être un produit	105
Figure 3.40 - Indicateur de la phase de vie parcourue par le produit	105
Figure 3.41 - Succession des activités au sein des régénérateurs	106
Figure 3.42 – Succession des activités de diagnostic de décomposition	107
Figure 3.43 - Succession des activités de diagnostic de remise en état.....	108
Figure 3.44 - Succession des activités de décomposition	109
Figure 3.45 - Classe de l'état de santé d'utilisation en fonction des classes de l'aspect physique et de l'état technique – exemple sur l'exigence EProdUPRD1 (taux de rayures) et sur 3 classes	110

Figure 3.46 - Etat de Santé du produit	111
Figure 3.47 - Caractérisation de l'état de santé régénération et utilisation en fonction des valeurs des exigences associées et de la phase de vie du produit	111
Figure 3.48 – Satisfaction de l'état de santé régénération	111
Figure 3.49 – Satisfaction de l'état de santé utilisation	112
Figure 3.50 - Satisfaction de l'aspect physique (A) et de l'état technique (B)	112
Figure 3.51 - Pattern de modélisation d'exigences d'utilisation évoluant en fonction de l'état (utilisation ou régénération) dans lequel se trouve le produit	113
Figure 4.52 - Répartition des tonnages de D3E traités en 2015 par mode de traitement – Extrait de (ADEME, 2016)	120
Figure 4.53 - Vue éclatée d'un lave-linge à ouverte frontale - Extrait du site Spareka de vente de pièces de rechanges et de conseil de réparation	122
Figure 4.54 – Product breakdown structure simplifiée du lave-linge, répartition de ses constituants selon leur type.....	123
Figure 4.55 - Taux de défaillance du lave-linge étudié.....	124
Figure 4.56 - Taux de défaillance de l'électrovanne étudiée.....	125
Figure 4.57 - Taux de défaillance de la carte électronique de commande étudiée.....	125
Figure 4.58 - Modélisation de la phase du cycle de vie parcourue par le lave-linge (Cas du scénario 1)	137
Figure 4.59 - Modélisation de l'activité de diagnostic de remise en état du déconnecteur	138
Figure 4.60 - Modélisation de l'activité de remise en état du lave-linge au sein du déconnecteur	139
Figure 4.61 - Modélisation de l'activité de requalification du lave-linge au sein du déconnecteur	140
Figure 4.62 – Agrégat de variables permettant la caractérisation de l'aspect physique du lave-linge_nutriment	141
Figure 4.63 - Estimation de la classe du produit_nutriment selon l'état de santé d'utilisation du produit	142
Figure 4.64 - Satisfaction des exigences processus	143
Figure 4.65 - Satisfaction des exigences d'utilisation	143
Figure 4.66 - Modélisation du comportement de la rouille sur le lave-linge au cours du temps.....	144

Figure 4.67 - Modélisation de la fiabilité du lave-linge dans les scénarios 2 et 3	145
Figure 4.68 - Exigences d'utilisation prises en compte par la déconnexion au moment du diagnostic de remise en état	145
Figure 4.69 - Cas de succession d'utilisateurs observés (courbes bleues) durant les simulations avec indication des instants où le lave-linge_déchet est envoyé en déconnexion (dirac rouges).....	148
Figure 4.70 - Exemple observé d'évolution de la consommation énergétique (CE).....	149
Figure 4.71 - Exemple de taux de défaillance et d'évolution de la fiabilité	150
Figure 4.72 - Nombre de cycles d'utilisation observés	150
Figure 4.73 - Classes satisfaites par le lave-linge au moment de la vente.....	151
Figure 4.74 - Pourcentage de lave-linges ayant connus X cycles d'utilisation (CU) pour les scénarios 2 (bleu) et 3 (orange)	152
Figure 4.75 - Date de fin de vie des lave-linges selon les cas observés du scénario 2	152
Figure 4.76 - Date de fin de vie des lave-linges selon les cas observés du scénario 3	153
Figure 4.77 - Pourcentage de classes atteintes après remise en état du lave-linge pour les scénarios 2 (bleu) et 3 (orange)	154
Figure 4.78 - Pourcentage de classes atteintes après remise en état du lave-linge dans le cas d'un changement des capacités de remise en état (jaune) et d'une augmentation de la fréquence des actions de maintenance périodique chez le fournisseur (vert)	156
Figure 4.79 – Nombre de cycle d'utilisation connus par le lave-linge dans le cas d'un changement des capacités de remise en état (jaune) et d'une augmentation de la fréquence des actions de maintenance périodique chez le fournisseur (vert)	156
Figure Ccl.80 - Cycles de vie d'un produit et de son régénérateur conçu après et en même temps que le produit	163
Figure A3.81 - Succession des étapes de remise en état.....	182
Figure A3.82 - Succession des étapes de requalification	183
Figure A4.83 - Conditions d'arrêt d'exploitation du lave-linge dans le cas du scénario 3	184
Figure A4.84 – Visualisation de l'électrovanne et de la carte Electronique de Commande présentes dans le lave-linge.....	185
Figure A4.85 - Modélisation des dates de défaillances sur les électrovannes (SV) et les cartes électroniques de commande (EC).....	186
Figure A4.86 - Modèle complet des activités de régénération	187

Figure A4.87 - Estimation de la durée de la phase de remise en état selon les classes satisfaites par le produit_déchet et de la classe du produit_nutriment souhaitée	188
Figure A4.88 - Caractérisation de l'état technique durant la phase de requalification..	189
Figure A4.89 - Modélisation du comportement des variables de rouille, de rayures et de bosses sur le lave-linge	189
Figure A4.90 - Evolution de la variable de fiabilité des électrovannes	190
Figure A4.91 - Evolution de la variable de fiabilité des cartes électroniques de commande	191
Figure A4.92 - Evolution de la variable de consommation énergétique des électrovannes	192
Figure A4.93 - Evolution de la variable de consommation énergétique des cartes électroniques de commande.....	193
Figure A4.94 - Identification de l'acquéreur et utilisateur du lave-linge_nutriment	194
Figure A4.95 - Modélisation de la prise en compte de la maintenance périodique chez les fournisseurs.....	194
Figure A4.96 - Modélisation des capitaux engendrés par le fournisseur laverie via la vente de son lave-linge, de l'achat d'un nouveau lave-linge (neuf ou régénéré) et des actions de maintenance réalisées	195
Figure A4.97 - Modélisation des capitaux engendrés par le déconnecteur via la vente de lave-linge régénéré et les actions de régénération réalisées.....	196
Figure A4.98 - Utilisateurs successifs du lave-linge pour le S2 et S3	197
Figure A4.99 - Capitaux du client type laverie pour le lave-linge observé	198
Figure A4.100 - Capitaux du client type résidence pour le lave-linge observé	199
Figure A4.101 - Capitaux du client type restaurant pour le lave-linge observé	199
Figure A4.102 - Capitaux du déconnecteur pour les S2 et S3	200

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 - Exemples de caractérisation d'un produit_nutriment non neuf selon ses exigences d'utilisation.....	76
Tableau 2.2 - Exemples d'exigences de régénération.....	78
Tableau 3.3 – Résumé des exigences satisfaites par les différentes méthodes retenues..	98
Tableau 3.4 - Terminologies utilisées selon le domaine de compétences - Extrait de (Stermann, 2000).....	101
Tableau 3.5 - Critères observables lors des simulations des modèles de stocks et flux sur la régénération d'un produit.....	116
Tableau 4.6 - Durées maximales d'utilisation fixées par les clients pour des lave-linges neufs et régénérés.....	127
Tableau 4.7 - Identification de la classe de l'état de santé en fonction de l'aspect physique et l'état technique	127
Tableau 4.8 – Fourchette de prix de vente du lave-linge_nutriment selon la classe satisfaite.....	127
Tableau 4.9 – Exemples d'exigences d'utilisation d'aspect physique du lave-linge_déchet pour le régénérateur déconnexion	129
Tableau 4.10 - Seuils de classification de l'aspect physique pour le lave-linge_déchet au sein du déconnecteur	129
Tableau 4.11 - Exemples d'exigences d'utilisation d'état technique du lave-linge_déchet pour le régénérateur déconnexion	129
Tableau 4.12 – Seuils de classification de l'état technique pour le lave-linge au sein du déconnecteur	130
Tableau 4.13 – Exemples d'exigences économiques processus des régénérateurs.....	130
Tableau 4.14 - Capacités de remise en état du lave-linge par le déconnecteur.....	133
Tableau 4.15 – Exemples d'exigences techniques processus régénérateurs	133
Tableau 4.16 - Synthèse des politiques et scénarios étudiés	147

Glossaire

D3E : Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques

Equipement : Elément utilisé par un utilisateur

Etat de santé produit : Etat de santé du produit, inclus l'état de santé de régénération et d'utilisation

Etat de santé de régénération : Etat de santé portant uniquement sur les exigences de régénération du produit_déchet

Etat de santé d'utilisation : Etat de santé portant uniquement sur les exigences d'utilisation du produit_déchet

Produit : Elément destiné à la vente, peut être issu des processus de fabrication ou des processus de régénération

Produit_déchet : Elément entrant dans un processus de régénération

Produit_nutriment : Elément sortant d'un processus de régénération

Abréviations

Nomenclature références exigences du Chapitre 4 : (1)(2)(3)(4)(5)(6)

(1) E : Exigence

(2) Prod : Produit / Proc : Processus

(3) U : Utilisation / R : Régénération

(4) T : Technique / Eco : Economique / P : Aspect Physique

(5) C : Client / R : Régénérateur

(6) D : Déchet / N : Nutriment

Termes employés dans les figures et équation du Chapitre 4

WM : Washing Machine | **SV** : Solenoid Valve | **EC** : Electronic Card

Regen : Regeneration

Disc : Disconnection | **Disass** : Disassembly

Recond : Reconditioning | **Certif** : Certification

PhyAspect : Aspect Physique | **TechState** : Etat Technique

Proc : Processus | **Prod** : Product

Relia : Reliability | **EU** : Energy Use

Introduction Générale

Ces dernières décennies, l'augmentation constante de la population mondiale et des produits personnalisés engendrent, dans le même temps, un appauvrissement des ressources disponibles dans la nature et un accroissement des produits jetés (déchets). Ces phénomènes impactent négativement le bien-être de l'Homme en détruisant l'environnement dans lequel il vit et en réduisant les possibilités de satisfaction de ses besoins. Pour que ces phénomènes ne prennent pas trop d'ampleur et deviennent irréversibles, il faut les combattre dès aujourd'hui.

C'est pourquoi, en 1987, lors d'un conseil de l'ONU, la notion de développement durable a vu le jour et a été introduite dans les stratégies gouvernementales de nombreux pays. Ce développement a pour objectif de préserver et maintenir le bien-être, présent et futur, de l'Homme, et fait l'objet de nombreuses actions législatives, notamment auprès des industriels.

Pour aider les industriels à mettre en place des actions permettant de réduire leurs impacts sur l'environnement, de nombreux scientifiques ont développé des concepts, des méthodes et des outils allant de la gestion de consommable à la création de matériaux plus respectueux de l'environnement, en passant par l'amélioration des processus de fabrication, et de traitement des déchets, et s'attellant à couvrir l'ensemble du cycle de vie des produits.

A l'heure actuelle, l'un des concepts en plein essor est celui de l'économie circulaire qui fait la promotion des boucles fermées, qui existent au sein de la nature, et des déchets vus comme des matières premières pour certains industriels. Cette économie est en rupture avec celle pratiquée aujourd'hui, et force les industriels à changer de paradigme, et à tendre vers un paradigme dit de « régénération ».

La bonne mise en place de ce paradigme nécessite de prendre en considération les exigences d'un grand nombre de parties prenantes (environnement, industriels, gouvernements, sociétés, particuliers...) et d'avoir un suivi régulier des produits afin de s'assurer qu'un produit ne soit pas vu comme un déchet par celui qui s'en sépare, mais comme une ressource pour un autre utilisateur.

L'objectif de ce manuscrit est de définir le paradigme de régénération au travers d'une analogie « monde du vivant et monde industriel » plus poussée que celle faite par l'économie circulaire, et de démontrer qu'elle peut être mise en place en exploitant les activités et des compétences métiers existantes, notamment celles de la maintenance.

Pour satisfaire cet objectif, ce manuscrit est organisé en quatre chapitres, comme suit :

Le premier chapitre permet d'introduire le cadre général de nos travaux de recherche, à savoir, le développement durable et les problématiques de raréfaction des ressources naturelles et d'accumulation des déchets. Il présente un des concepts repris par de nombreux gouvernements internationaux : l'économie circulaire. En effet, cette économie se veut être une solution aux problèmes soulevés par le développement durable. Les idées qu'elle défend sont issues de courants de pensée répondant à un ou plusieurs points mis en exergue par le développement durable. Dans l'objectif de soutenir ce développement et cette économie, de nombreux méthodes et outils ont vu le jour au sein de la communauté scientifique. Certains d'entre eux sont détaillés dans ce premier chapitre, et nous permettent de positionner nos travaux par rapport à l'existant, et de mettre en avant les points auxquels nous souhaitons apporter des éléments de réponse dans ce manuscrit.

Dans un deuxième chapitre, nous développons le « paradigme de régénération ». Pour cela, nous nous appuyons sur le biomimétisme, et plus particulièrement, sur l'aspect régénératif de la nature pour mettre en évidence les entités manquantes dans la sphère technique et obtenir un comportement similaire à celui de la nature dans la sphère technique. Le comportement de la nature n'étant pas facilement reproductible sur le moyen terme, nous proposons deux politiques permettant de mettre en place la régénération industrielle progressivement. Ensuite, en s'inspirant de la notion de nutriment et de boucles fermées défendus par l'économie circulaire, nous proposons de spécifier d'une part les exigences sur le produit afin de le régénérer, et d'autre part, des exigences sur les processus de régénération. Finalement, nous proposons de mettre le processus de maintenance au centre de la régénération industrielle, car nous estimons qu'avec ses activités (surveillances, pronostic...) et sa vision d'ensemble, il est un bon candidat pour piloter efficacement cette régénération sur le long terme.

La régénération industrielle étant un concept complexe difficile à mettre en place, nous proposons, dans le chapitre 3, un outil d'aide à la décision modélisant le comportement du produit_déchet et permettant de simuler différentes politiques de régénération, et ainsi d'aider les entreprises à identifier les conditions nécessaires à la mise en place de ces politiques. Nous proposons une modélisation générique de la régénération, en tenant compte des éléments développés dans le chapitre 2. Cette modélisation doit permettre aux entreprises de créer leurs propres modèles, puis de les simuler pour déterminer si la régénération industrielle est intéressante pour eux ou non, et d'identifier les éléments qui sont à l'origine du non-intérêt de la régénération.

Finalement le chapitre 4 nous permet d'illustrer le bien-fondé de la régénération, pour les deux politiques proposées au chapitre 2, en appliquant les modèles réalisés au chapitre

3 au travers d'un cas d'applications portant sur les D3E (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques) qui sont les types de déchets les plus présents dans les décharges.

La dernière partie de ce manuscrit apportera des conclusions sur le travail proposé dans cette thèse, et proposera des perspectives à court terme et à long terme.

Chapitre 1 : Contexte et Problématique

I. Introduction

À l'heure où la population ne cesse de croître (plus de 7.5 milliard d'individus en 2017 contre 6,1 milliards en 2000)¹, la consommation en produits finis s'accroît, et les déchets s'amoncellent, la survie de l'Homme et de toutes espèces vivantes, est menacée, et est devenue une préoccupation (politiques, scientifiques...) à l'échelle mondiale. Sont inclus dans cette préoccupation :

- le réchauffement climatique (augmentation de la température de la surface de la Terre de +0.74 °C, en moyenne, entre 1906 et 2005)(Planton et al., 2015).
- l'épuisement des ressources naturelles (l'Homme consomme chaque année plus de ressources naturelles que la planète ne peut en régénérer. Ce phénomène est appelé « point de dépassement » et a été atteint le 2 août en 2017 contre le 13 août en 2015) (WWF, 2016).
- l'accumulation des déchets (297 millions de tonnes de déchets produits en France en 2004 contre 345 millions en 2012, dont plus de 40% sont stockés) (ADEME, 2016).

La survie des générations présentes et futures étant mis en péril par la surproduction et la surconsommation de biens, l'Organisation des Nations Unies (ONU) s'est vue dans l'obligation de réagir et a introduit le terme de « Développement Durable » en 1987 dans le rapport de Brundtland (WCED, 1987), rédigé par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Ce rapport est ensuite utilisé comme base lors de la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement de 1992, plus connue sous le nom de « Sommet de Rio ».

La notion de développement durable a été précisée sous la forme de 27 principes lors de cette conférence, et se définit comme étant : « ***un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs*** » (principe 3 de la déclaration du sommet de Rio) (Nations Unies, 1992).

Ce développement s'appuie sur 3 piliers : économie, environnement et société (Figure 1.1), et doit être viable (environnement-économie), équitable (économie-société) et vivable (société-environnement) pour être durable.

¹ World Population Prospects - The 2015 Revision : <https://esa.un.org/unpd/wpp/>

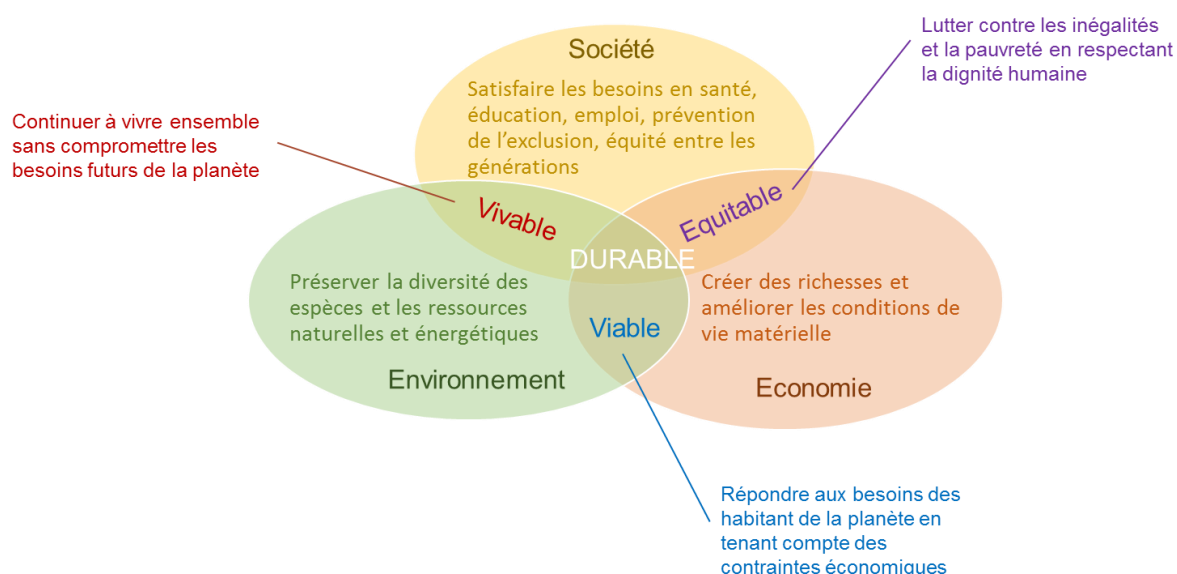


Figure 1.1 - Diagramme de Venn représentant les piliers du développement durable et les définitions associées à chaque terme – inspirée de « Développement Durable »²

Au travers des conférences, sommets, conseils internationaux réalisés depuis les années 90, de nombreux traités en faveur du développement durable ont été ratifiés par de nombreux pays. Chacun de ces traités implique sa mise en application au niveau des pays signataires, sous forme de directives, lois, décrets...

Parmi les dernières lois parues en France sur le thème du développement durable, nous pouvons citer la loi « transition énergétique pour la croissance verte » parue au Journal Officiel en août 2015 (LOI 2015-992, 2015), et qui a, entre autres, pour objectif de contribuer plus efficacement à la lutte contre le réchauffement climatique et à la préservation de l'environnement (réduction des matières premières puisées dans la nature et des déchets mis en décharges). Cette loi met en exergue plusieurs « mesures phares » telles que le développement des énergies renouvelables, la rénovation du parc bâtiments existants, la lutte contre les gaspillages et la promotion de l'économie circulaire.

C'est sur cette dernière mesure que nous portons notre attention. Celle-ci a fait l'objet de la création de plusieurs fondations et institut à travers le monde, et se veut être un des modèles économiques les plus à même de répondre aux piliers du développement durable.

La première partie de ce chapitre développe les principes défendus par l'économie circulaire ainsi que les courants de pensée sur lesquels elle s'appuie. La deuxième partie se focalise sur les concepts, les méthodes et les outils proposés dans la littérature pour soutenir le développement durable et l'économie circulaire, afin d'aider les industriels à

² <http://www.developpementdurable.org>

en tenir compte dans leur stratégie. Finalement, une troisième partie met en évidence les manques des différents concepts et méthodes vus dans les parties précédentes et ceux auxquels nous nous proposons de répondre.

II. Economie Circulaire

L'économie circulaire est un modèle économique qui se veut être en rupture avec celui actuellement pratiqué : l'économie linéaire (prendre/fabriquer/utiliser/jeter) qui est à l'origine de la raréfaction des ressources naturelles et de l'accumulation des déchets. En effet, l'économie circulaire est vue comme une économie répondant au développement durable en produisant des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages de ressources ainsi que la production de déchets (Ellen MacArthur Foundation, 2009; Institut de l'économie circulaire, 2013; Ministère du Développement durable, 2016).

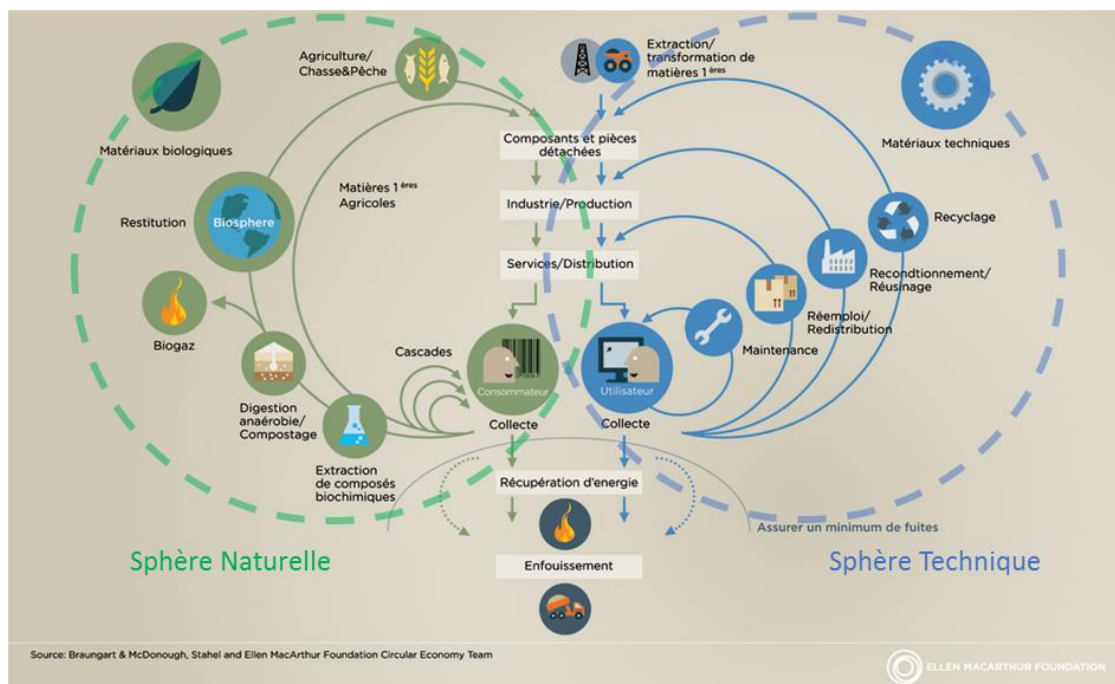


Figure 1.2 - Schéma de l'économie circulaire - Extraite et adaptée de (Foundation Ellen MacArthur, 2014)

Elle a donc pour objectif de découpler la croissance économique de l'épuisement des ressources finies. Afin de répondre à cet objectif, cette nouvelle économie se base sur le principe de boucle fermée, telle que celles présentes dans la nature transformant sans cesse tout élément de manière à nourrir/produire un autre être vivant (Barbault, 2008) (Figure 1.2).

Les boucles de l'économie circulaire se divisent en deux grandes catégories dépendant du type de matériaux à transformer (technique ou naturel) et permettent d'alimenter, respectivement, la sphère technique et la sphère naturelle. Au sein de la sphère technique, ces boucles permettent d'alimenter les différents processus de la chaîne de production d'un produit, en fonction des actions opérées sur le produit.

Au travers de boucles fermées et d'interactions entre ces deux sphères, l'économie circulaire prône **une harmonie** entre le milieu naturel et le milieu technique qui doit sans cesse être maintenue pour satisfaire les principes portés par le développement durable, notamment, les principes 1, 3, 4, 7, 8, 17 et 22 (ces principes sont énoncés en Annexe – Chapitre 1) de la déclaration de Rio.

Chacun de ces principes est défendu par au moins un des courants de pensée constituant l'économie circulaire. Ces courants de pensée sont les suivants :

- l'économie de fonctionnalité,
- le biomimétisme,
- le Regenerative Design,
- l'écologie industrielle,
- Cradle to Cradle.

Ces courants sont apparus à des époques différentes et sont étudiés de manière disjointe, mais ils défendent tous la nécessité de changer de modèle économique, de paradigme.

1. Economie de Fonctionnalité

L'économie de fonctionnalité est une stratégie marketing qui s'oppose à l'obsolescence programmée (technique destinée à réduire la durée de vie d'un produit pour augmenter le taux de remplacement (défaillance, effet de mode, pression sociale...) (Fabre and Winkler, 2010)) en vendant une fonction ou en louant un bien. En d'autres termes, le fournisseur reste le propriétaire des biens qu'il produit (Stahel, 2005), et répond au principe 8 de la déclaration de Rio sur la révision des modes de production et de consommation des biens.

Parmi les exemples les plus récurrents dans la littérature, nous pouvons citer :

- le cas de Xerox, vendeur de photocopieurs, qui, suite à des problèmes de vente sur ses nouveaux modèles, a décidé de rester propriétaire de ses appareils afin de pouvoir les faire évoluer et de récupérer les composants pour créer de nouvelles machines (Mcaloone and Andreasen, 2002).
- le cas de Michelin, secteur du transport routier, qui ne vend plus de pneus mais vend des kilomètres parcourus par pneu, tout en offrant une assistance chez le client

(Buclet, 2005). Ainsi les pneus peuvent être récupérés avant qu'ils ne puissent plus être réchappés ou recreusés. De plus, en ayant des pneus toujours en bon état, la consommation de carburant des véhicules équipés en est fortement réduite, ainsi que les risques d'accidents (Baines et al., 2007).

Les méthodes et outils répertoriés par (Vasantha et al., 2012) ont été créés dans l'objectif d'aider les entreprises à évaluer la pertinence de la mise en place de l'économie de fonctionnalité par rapport aux biens proposés, et à évaluer la capacité de l'entreprise à évoluer vers ce modèle économique, et de les guider dans sa mise en place (conception des produits vendus en tant que services, établissement des plannings des phases de maintien et de changements des produits loués...).

Outre la révision de la stratégie de l'entreprise, les consommateurs ont une place décisive dans l'économie de fonctionnalité, car ils doivent accepter de ne plus être propriétaires. Même si cette économie permet aux utilisateurs d'être toujours à la pointe de la technologie, cette vision a du mal à s'installer dans certains pays, et dans beaucoup de secteurs.

2. Biomimétisme

Le biomimétisme correspond à l'étude de la nature afin de l'imiter. Elle a pour objectif d'observer les mécanismes naturels, les comprendre et les reproduire afin de les appliquer aux technologies développées par l'Homme. La biologiste Janine Benyus, qui a fait émerger cette discipline, a identifié 10 leçons données par la nature et dont l'homme devrait tenir compte dans son développement (Benyus, 2009). Parmi celles-ci figurent l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable, le recyclage de toute matière, la consommation de ce qui est nécessaire...

Les études biomimétiques actuellement réalisées portent principalement sur la production d'énergie (devenue vitale à la société) et la fabrication de matériaux plus performants, plus respectueux de l'environnement et de l'Homme. Ainsi dans le cadre de la production d'énergie, les scientifiques s'intéressent à l'exploitation des rayonnements du soleil via la photosynthèse réalisée par les plantes (Gust and Moore, 1989). En utilisant ce principe, la photosynthèse artificielle serait capable de produire de l'énergie en récupérant les gaz produits par l'oxydation de l'eau (Gust et al., 2012; Nocera, 2012). Dans le cadre de la fabrication de matière, les scientifiques étudient les caractéristiques de certains êtres vivants et des substances qu'ils sécrètent pour les reproduire de manière artificielle. Parmi ces recherches, nous pouvons citer la colle produite par les moules pour

rester accrochées à un rocher même sous l'eau, le fil produit par les araignées pour tisser leurs toiles, ou la coquille de l'ormeau qui résiste à de grosses pressions sans se briser (Benyus, 2009). Dans le même ordre d'idées, des chercheurs se sont inspirés de la capacité de régénération des lézards, salamandres pour mettre au point un matériau capable de s'auto-réparer suite à une présence de fissures (Castanié, 2013; Toohey et al., 2007; White et al., 2001).

Le biomimétisme est l'un des piliers de l'économie circulaire car, grâce à l'étude de la nature, l'idée de boucles fermées et celle de valoriser les déchets ont pu émerger au sein de la sphère industrielle. Ce courant de pensées sert également de base pour les courants de pensées développés ci-après.

3. « Regenerative Design »

Le « Regenerative Design » est un concept basé sur la théorie des systèmes (Bertalanffy, 1980) et sur le biomimétisme pour développer des écosystèmes viables et durables en tenant compte du développement humain, de sa culture et de l'environnement dans lequel il vit (Cole, 2012; Cole et al., 2013) (principes 3, 4 et 22 de la déclaration de Rio).

Selon (Akturk, 2016), ce concept est souvent mis en parallèle avec le « Sustainable Design » qui s'appuie sur la définition du développement durable pour concevoir un produit. Toutefois pour (Mang and Reed, 2012), la notion de « durable » implique de perdurer dans le temps sans se dégrader, c'est-à-dire aucun changement, aucun renouvellement, tandis que celle de « régénératif » implique l'idée d'une dynamique réutilisant l'existant pour créer du nouveau, permet de répondre aux besoins des Hommes qui évoluent sans cesse. En faisant le parallèle avec la nature, il est aisé de constater qu'elle n'est pas durable, mais changeante (Mang and Reed, 2013). Tout écosystème évolue à un moment donné, et au sein même de cet écosystème, il n'est question que de régénération.

Un exemple d'application, dans le milieu agricole, du principe de « Regenerative Design » est la permaculture (Ferguson and Lovell, 2013; McManus, 2010). Cette culture qui repose sur l'idée de faire cohabiter plusieurs types de plantations et où chacune est bénéfique à une autre (ex : planter des arbres fruitiers dans les champs de blé pour drainer l'eau et apporter de l'ombre aux brins de blé, tout en ayant la possibilité de récolter des fruits après la moisson du blé). Un autre exemple est celui de la « construction naturelle », c'est-à-dire, l'utilisation de matériaux naturels pour la construction d'un bâtiment (du Plessis, 2012). Cette construction s'appuie sur les matériaux présents sur le lieu de

construction, sur les caractéristiques climatiques de ce lieu afin d'orienter le bâtiment de façon à profiter, de la fraîcheur apportée par les arbres, des couloirs de vent en plaçant les fenêtres aux bons endroits...

Le concept de « Regenerative Design » est complexe à mettre en place car cette conception tend à transformer les comportements destructeurs de l'Homme pour qu'ils soient en symbiose avec la nature. Afin de remédier à cette difficulté, des outils (LENSES (Plaut et al., 2011) et REGEN (Svec et al., 2012)) ont été mis au point pour la conception de projets orientés « Regenerative Design ». Ces outils se focalisent principalement sur les processus, et s'appuient sur des outils d'évaluation de performances issus du bâtiment, auxquels sont ajoutées des exigences liées à l'aspect social, culturel, économique et écologique.

4. Ecologie Industrielle

L'écologie industrielle consiste à développer des procédés pour réduire l'exploitation des ressources et la production de déchets en passant principalement par des synergies entre entreprises. C'est-à-dire que les entreprises vont échanger leurs déchets afin que d'autres les utilisent comme matières premières secondaires (Erkman, 2004).

Cette écologie est définie comme étant une étude des interactions et des relations inter-entreprises et entre entreprises et nature (Ayres and Ayres, 2002). Elle est également définie par (Lombardi et al., 2012) comme étant un « *outil pour manager l'impact environnemental des activités industrielles et pour supporter l'intégration et la mise en place du développement durable* » (principe 7 et 17 de la déclaration de Rio).

L'objectif final de l'écologie industrielle est de tendre vers un modèle où l'entreprise est auto-suffisante, c'est-à-dire que chaque entreprise n'est alimentée en flux de matières que par ses déchets (rejets matières) et ce qu'elle a produit. Toutefois, ce modèle étant actuellement difficilement atteignable, l'écologie industrielle se focalise sur la création de parcs « éco-industriels » (Chertow, 2000) où chaque entreprise réutilise au maximum ses déchets, et, lorsque cela n'est pas possible, les vend à d'autres entreprises qui s'en serviront comme matières premières.

L'un des premiers et des plus célèbres parcs éco-industriels est celui de Kalundborg au Danemark qui a été créé dans les années 1970. Ce parc regroupe une centrale énergétique, un fabricant de plâtre, une entreprise pharmaceutique, une entreprise de traitement des sols et une raffinerie ainsi que la commune de Kalundborg (Ehrenfeld and Gertler, 1997). Depuis sa création, ces entreprises ont vu leur consommation de matières premières

brutes diminuer tout en continuant à produire et à répondre à leurs objectifs (Chertow and Park, 2016).

D'autres parcs ont été créés à travers le monde, mais toujours de manière très isolée, excepté pour la Chine qui a mis en place, en 2010, de nombreux projets de parcs tests, regroupant 109 entreprises, 33 parcs éco-industriels, 7 régions, 19 villes (dont Beijing et Shanghai) (Su et al., 2013; Yune et al., 2016).

Malgré les applications fructueuses de l'écologie industrielle, celle-ci reste encore peu appliquée, notamment parce qu'elle demande aux entreprises de partager leurs données quant aux matières utilisées dans la fabrication de leurs produits afin de trouver les meilleures collaborations, et qu'elle implique aux entreprises de fournir un flux de déchets régulier et toujours de même qualité.

5. « Cradle to Cradle » (C2C)

Le concept de « Cradle to Cradle » (du berceau au berceau) s'appuie sur une approche biomimétique des produits afin que ceux-ci soient bénéfiques à l'Homme et à son environnement (principe 1, 3 et 4 de la déclaration de Rio).

Ce concept a été popularisé par le chimiste allemand Micheal Braungart et l'architecte américain William McDonough au travers du livre « Cradle to Cradle : Créer et recycler à l'infini » (McDonough and Braungart, 2010), devenu une référence dans le domaine de l'écoconception et l'économie circulaire.

Pour ses auteurs, tout élément conçu doit être capable de réintégrer le cycle naturel ou technique. Ainsi, ils ont développé les termes de nutriments biologiques et techniques. Les nutriments biologiques correspondent aux matériaux organiques (bois, coton) qui peuvent se décomposer dans la nature sans lui nuire. Les nutriments techniques correspondent aux matériaux inorganiques ou synthétiques qui sont fabriqués par l'Homme, et qui doivent être réutilisés le plus longtemps possible dans le cycle technique.

L'objectif final du C2C est d'avoir zéro pollution et 100% de réutilisation. A cette fin, un label a été créé pour certifier une conception de produits respectueuse de l'environnement et de l'Homme. Pour mettre en place ce label, (McDonough Braungart Design Chemistry (MBDC), 2013) ont défini une liste d'indicateurs que les entreprises doivent respecter pour obtenir le label C2C. Ce label se compose de plusieurs niveaux attestant du nombre d'indicateurs satisfaits par le produit au moment de sa conception.

Le plus grand cas d'application de ce concept est sans doute l'usine « River Rouge » de Ford dans le Michigan (Ellen MacArthur Foundation, 2009; McDonough and Braungart, 2010). Cette usine a été complètement réaménagée avec l'aide de W. McDonough en :

- créant de grands espaces de travail vitrés pour profiter de la lumière du jour,
- supprimant un maximum de produits toxiques,
- couvrant les toits des bâtiments de plantes capables de récupérer l'eau de pluie,
- en assainissant l'eau utilisée par l'entreprise...

Alors que la tendance populaire tend à dire que produire durable c'est consommer moins, le C2C défend l'idée qu'être durable ce n'est pas forcément consommer moins, mais consommer mieux (Llorach-Massana et al., 2015).

Les courants de pensées de l'économie circulaire prônent le fait que l'Homme ne doit pas uniquement se soucier de son bien-être économique mais également de celui de l'environnement, notamment parce qu'il y vit et qu'il a besoin de ses apports pour vivre. En s'inspirant de tous ces courants, l'économie circulaire satisfait l'ensemble des piliers du développement durable.

Toutefois, cette économie reste encore à l'état de concept théorique car difficile à mettre en place dans sa globalité. Selon (Webster, 2013), ces difficultés sont dues à :

- l'interaction de nombreux éléments qui ne peuvent être dissociés au risque d'altérer le bon fonctionnement de l'économie circulaire. Ainsi, par exemple, le contexte, qui est souvent négligé, est un élément important pour comprendre où et comment évolue le système. Le moindre changement au niveau de l'environnement du système peut avoir un impact sur le système, et inversement.
- le manque de formations et de séminaires de sensibilisation à l'économie circulaire, ce qui permettrait aux plus grand nombre d'appréhender et de comprendre dans les grandes lignes cette économie. Pour qu'elle soit mise en place, il faut qu'elle devienne une manière de penser naturelle, tout comme l'est à l'heure actuelle celle de l'économie linéaire.

A celles-ci s'ajoute le partage des données. En effet, les entreprises ont une culture de la confidentialité des données, ce qui freine la mise en place des principes de l'économie circulaire, qui repose en grande partie sur les échanges (données, matières, produits, énergies...) entre ses parties prenantes.

III. Prise en compte de l'économie circulaire tout au long du cycle de vie d'un produit : Etat de l'art

Depuis que les notions de développement durable et d'économie circulaire sont apparues, les concepts autour de celles-ci n'ont cessé de se développer au sein de la communauté scientifique, remettant parfois en cause les approches appliquées depuis des décennies. Ces concepts portent sur l'ensemble du cycle de vie des produits (Figure 1.3), allant de la conception au retrait, et sont développés dans cette partie.

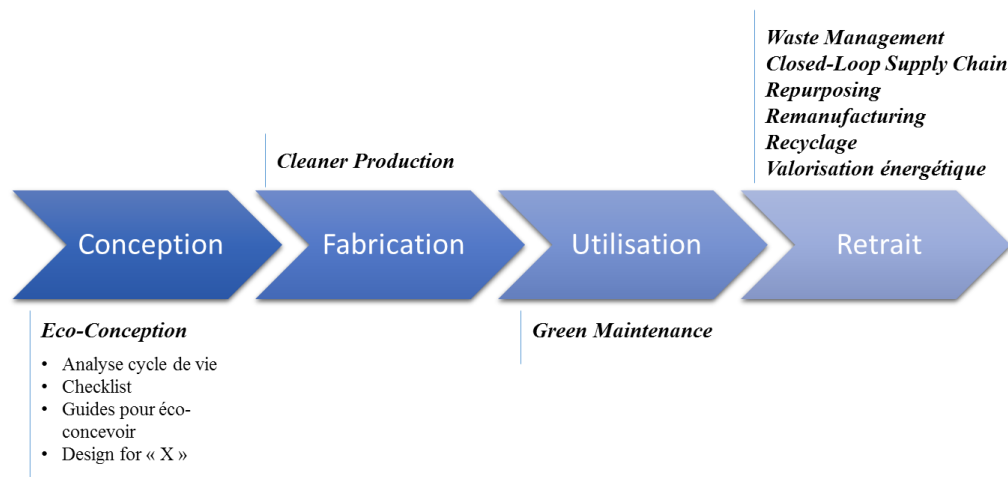


Figure 1.3 – Concept pour la prise en compte du développement durable et de l'économie circulaire selon la phase du cycle de vie du produit

1. Conception - Ecoconception

La conception est la première phase dans le cycle de vie d'un produit. Elle regroupe l'ensemble des processus qui transforment des exigences clients en caractéristiques spécifiées ou en spécification d'un produit, d'un processus. Selon (Wenzel et al., 2000), 80% des impacts futurs du produit sont définis par des décisions prises lors de cette phase. En effet, c'est à ce moment que les matériaux sont sélectionnés, que les assemblages de matières et de composants sont déterminés, que les performances visées sont calculées et décidées, et que les scénarios et les conditions d'utilisation sont définis.

De par son grand impact sur la vie d'un produit, ce processus est un des processus clés pour la prise en compte du développement durable au sein de la sphère technique (Alonso Movilla, 2016). En pensant au futur d'un produit dès sa conception, il est envisageable, par exemple, de réduire les quantités de déchets produits et de ressources consommées lors de sa fabrication, de minimiser sa consommation énergétique lors de son utilisation, de maximiser les matières récupérées lors de son retrait, voire d'envisager les vies futures

de ce produit. Cette façon de penser la conception est appelée « écoconception », ou encore « Design for Environment » (DfE).

L'éco-conception est vue comme une démarche préventive et proactive (Issa et al., 2015) d'intégration de l'environnement lors de la phase de conception des produits et des services, englobant différentes notions telles que l'éco-efficience, la santé et la sécurité, le remanufacturing, le recyclage, la réduction des sources (matières premières, énergies...) et la minimisation des déchets (Glavič and Lukman, 2007). Cette manière de concevoir est, selon (Tyl, 2011) :

- une approche globale dont les parties prenantes sont les fournisseurs de matières premières, les fabricants, les transporteurs et les entreprises de recyclage.
- une approche multi-étapes (ensemble des processus du cycle de vie),
- une approche multi-critères (ensemble des impacts environnementaux générés sur un cycle de vie tels que l'épuisement des ressources, l'augmentation de l'effet de serre, les rejets de polluants, la production de déchets et la transformation des milieux naturels),

L'écoconception intègre des concepts novateurs et oblige à avoir une vue globale du cycle de vie des produits. De nombreuses méthodes et outils ont été développés pour aider les industriels à la prendre en considération, et permettent d'évaluer l'impact environnemental des industriels et de concevoir des produits respectueux de l'environnement, sur tout ou partie des phases du cycle de vie du produit (Pochat, 2005).

1.1. Evaluation de l'impact environnemental

Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit sur une phase ou sur l'ensemble de son cycle de vie permettent de transformer un inventaire de flux en une série d'indicateurs d'impacts quantifiés (Lacoste and Robiolle, 2011) dans le cas de l'analyse cycle de vie, et de mettre en évidence les phases critiques (en termes environnemental) à l'aide de checklists (Rousseaux et al., 2017).

1.1.1. Checklist

La checklist est une méthode très répandue dans le milieu industriel, notamment auprès des petites et moyennes entreprises (Ramani, 2010), car elle est facile d'accès, simple, et a un faible coût de mise en place. Parmi les checklist les plus utilisées, nous pouvons citer celle développée par l'université des technologies de Vienne en Autriche :

« Ecodesign Pilot » (Schöggl et al., 2017). Celle-ci est proposée sous forme d'un logiciel gratuit et disponible en ligne³.

A l'image des guides, les checklist permettent de se poser les bonnes questions afin d'identifier les phases critiques du cycle de vie d'un produit donné. Par exemple, il s'agit de proposer des mesures à mettre en place pour améliorer ces phases d'un point de vue environnemental (Ramani, 2010), en minimisant le transport (surtout matériels et composants), en créant des synergies avec des entreprises locales, en exploitant les matériaux de la région (Tyl et al., 2015)...

Cependant, la méthode de checklist permet uniquement de se poser les bonnes questions pour un problème donné, sans offrir de solutions concrètes.

1.1.2. Analyse cycle de vie

L'analyse cycle de vie (ACV) est une méthode permettant d'identifier et d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un processus en s'intéressant à l'ensemble de ses phases de vie (Jolliet et al., 2010), dans l'objectif d'exploiter les ressources de manière plus efficiente et de diminuer les impacts négatifs.

Cette méthode est la plus répandue dans le milieu industriel, et a fait l'objet de nombreuses recherches, donnant naissance à un grand nombre d'outils. L'outil le plus couramment utilisé est le logiciel SIMAPRO qui utilise la base de données « EcoInvent » (Frischknecht et al., 2004). Cette base regroupe plusieurs milliers d'inventaires environnementaux en se basant sur des connaissances d'experts issus de domaines différents, et s'appuie sur des données liées aux matériaux composants un produit, à l'approvisionnement, à la production d'énergie et aux traitements des déchets (Vallet et al., 2013).

De manière générale, l'écoconception est souvent confondue avec l'ACV. Ainsi, de par sa popularité, l'ACV fait l'objet d'une généralisation de sa démarche sous forme de normes ISO : ISO 14040 (AFNOR, 2006a) et ISO 14044 (AFNOR, 2006b).

Cette analyse se déroule en 3 grandes étapes :

- Faire l'inventaire des flux de matière et d'énergie (évaluation des flux de matière (intrants et extrants), des émissions de substances polluantes et des consommations d'énergie),
- Faire une évaluation des impacts environnementaux associés à la consommation de ressources, aux émissions dans l'air et l'eau et à la production de déchets solides

³ <http://pilot.ecodesign.at/pilot/ONLINE/FRANCAIS/INDEX.HTM>

- Interpréter les résultats

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence la phase de vie qui a le plus gros impact sur l'environnement, mais également, le ou les processus qui en sont à l'origine, et permettent, ensuite, de définir les actions à mettre en place pour réduire cet impact.

Toutefois, l'interprétation de ces résultats n'étant pas toujours aisée, (Nadoveza et al., 2013) proposent une nouvelle approche transversale de l'ACV afin de faciliter les analyses visuelles, en utilisant une représentation graphique des différents facteurs impactant les phases du cycle de vie. Cette approche permet d'avoir une meilleure visibilité de l'information pour améliorer les aides à la décision, notamment celles portant sur les actions de réduction de l'empreinte carbone.

Le point faible des analyses de cycle de vie est qu'elles se basent sur des systèmes existants. Or ces hypothèses faites à partir de systèmes existants ne resteront pas stables dans le temps et ne seront pas valables pour le futur. Ainsi, si certaines hypothèses peuvent être validées pour des produits à durée de vie courte, elles semblent plus hasardeuses pour des produits à longue durée de vie (Holma et al., 2013).

1.2. Aide à la conception

Les méthodes d'aide à la conception ont pour objectif de fournir aux concepteurs des indicateurs et des guides leur permettant de se poser les bonnes questions pour réussir à répondre aux défis du développement durable (Alhomsy, 2012).

1.2.1. Guides pour éco-concevoir

En ce sens, (Luttropp and Lagerstedt, 2006) ont défini un ensemble de 10 règles à suivre pour aider les entreprises à faire de l'écoconception. Ces règles servent également de base pour créer les guides qu'il est possible de trouver dans la littérature, et font référence à l'ensemble du cycle de vie produit.

En effet, durant la phase de conception (concerne uniquement le produit), le produit doit être conçu de manière à ne pas utiliser de matières toxiques, à ne pas consommer trop d'énergie et de ressource au moment de l'utilisation, et à minimiser le poids du produit tout en étant de haute qualité. Durant les phases de fabrication et d'utilisation, les processus ne doivent pas consommer trop d'énergie et de ressources ; le produit doit pouvoir être réparé, voire amélioré, tout en augmentant sa durée de vie grâce à une meilleure maintenance. Pour la phase de fin de vie, il faut au préalable avoir prévu son recyclage grâce à des étiquetages, des manuels, à sa modularité, et éviter les mélanges de

matières, utiliser des matières recyclables et/ou recyclées, minimiser le nombre d'éléments à assembler, utiliser des techniques d'assemblages permettant un désassemblage aisé.

Un exemple de guide réalisé sur la base de 10 règles d'or est le guide « ECOFAIRE ». Celui-ci a été créé par des collectivités territoriales et en collaboration avec l'ADEME (Vallet et al., 2013). Ce guide a pour objectif de faciliter l'intégration des paramètres environnementaux dans les phases de conception et de développement, et d'évaluer le produit existant afin de pouvoir les améliorer pour aller dans le sens de l'écoconception.

De nombreux guides existent, toutefois la plupart se focalisent exclusivement sur une seule phase du cycle de vie, telle que celles avant l'utilisation (guides intitulés « design for assembly », « design for manufacturing »), ou encore après l'utilisation (guides orientés processus de fin de vie (Ijomah and McMahon, 2007; Lofthouse and Bhamra, 2005; Sundin, 2004). Ces derniers guides sont appelés « Design for End-of-Life ».

1.2.2. Guides « Design for End-of-Life »

Les guides d'écoconception prenant en compte la phase de retrait se sont développés depuis le début des années 90, et se focalisent sur la valorisation des produits finis et non sur la prévention des déchets (Alonso Movilla, 2016). Ces guides se caractérisent par l'intégration des aspects environnementaux de la phase de fin de vie, dans la conception du produit (Alonso Movilla and Zwolinski, 2015; Devadula and Chakrabarti, 2015; Germani et al., 2014), et mettent parfois l'accent sur l'amélioration d'une stratégie de valorisation. Ce sont ces derniers guides que nous détaillons dans cette section car, en optimisant ces stratégies, les déchets peuvent être mieux traités, et par conséquent, répondre aux problèmes d'accumulation des déchets.

Design for Reuse

Même si certains guides proposent des critères clés pour assurer un meilleur potentiel de réutilisation au produit (Arnette et al., 2014), les travaux portant cette vision sont très peu présents dans la littérature (Bauer et al., 2016). En effet, un produit n'est réutilisé que si son utilisation n'a pas trop impactée ses performances. De manière générale, ces produits sont réutilisés en tant que pièces détachées pour réparer un autre produit.

Pourtant, selon (Arnette et al., 2014; Gelbmann and Hammerl, 2015; Ziout et al., 2014), la conception pour la réutilisation est la conception qui a le plus d'impacts sur l'environnement, et devrait être mise en place pour la majorité des produits conçus. C'est dans cette approche de réutilisation que les travaux développés dans ce manuscrit se situent.

Design for Disassembly

Selon (Kuo, 1997), l'objectif du désassemblage est de pouvoir désassembler un produit en ayant un minimum de coûts et d'efforts. (Luttrupp and Lagerstedt, 2006) ajoutent à cet objectif la récupération des composants et/ou des sous-ensembles, en vue d'un réemploi sous forme de pièces détachées.

Les recherches menées dans ce domaine, en termes de conception, se focalisent entre autres sur l'étude des moyens d'assembler des composants et/ou des sous-ensembles (colle, écrou-boulon, scratch,...) (Coulter and Bras, 1998) afin de pouvoir les désassembler facilement tout en garantissant une bonne tenue lors de l'utilisation ; et des manières d'agencer les éléments les uns par rapport aux autres afin de faciliter les accès (accessibilité) (Desai and Mital, 2017).

D'autres recherches sont également faites sur l'optimisation du désassemblage (Bentaha et al., 2014), permettant aux concepteurs d'identifier les tâches les plus pénibles ou les plus délicates à réaliser afin d'y remédier dès la phase de conception.

Design for Remanufacturing

Le remanufacturing est défini comme étant un processus industriel qui redonne à un produit ayant déjà été utilisé un niveau de performance équivalent à celui d'un produit neuf (Lund and Mundial, 1984). Bien qu'il soit le processus de fin de vie le plus étudié de ces dernières années, très peu de recherches portent sur la conception du produit en vue de son remanufacturing (Go et al., 2015; Goodall et al., 2014). Ainsi dans (Hatcher et al., 2011), les auteurs concluent que les recherches sur le design for remanufacturing sont encore à développer, notamment les travaux liés à son intégration dans le processus de conception (pensée cycle de vie) et à la connaissance des exigences à satisfaire.

A cette fin, les recherches sur le « design for remanufacturing » peuvent s'appuyer sur les recherches menées dans la cadre du développement de méthodes et d'outils permettant de « remanufacturer » les produits arrivés en fin de vie (Hatcher et al., 2011; Ijomah and McMahon, 2007; Ismail et al., 2015). L'objectif est d'extraire les exigences que doit satisfaire un produit pour être facilement « remanufacturable » ou « refabriquable » (Charter and Gray, 2008; Go et al., 2015).

Dans (Hatcher et al., 2011), les auteurs concluent que les recherches sur le design for remanufacturing sont encore à développer en particulier en ce qui concerne son intégration dans le processus de conception (pensée cycle de vie) et la connaissance des exigences à satisfaire.

Design for Recycling

Le « Design for Recycling » se focalise principalement sur les matières recyclables afin de réutiliser au mieux la matière, et réduire l'extraction des matières premières (Gaustad et al., 2010). En effet, l'objectif à long terme du recyclage est de ne plus puiser de matières premières dans la nature, mais d'utiliser les matières d'un produit pour en créer d'autres. Pour cela, les matériaux utilisés doivent être recyclables et facilement séparables les uns de autres (Kriwet et al., 1995).

Outre, les matières, le « Design for Recycling » se focalise sur l'amélioration des processus de transformation (réduction de la consommation des ressources, amélioration du rendement..., la création de nouveaux processus pouvant recycler de nouvelles matières, la création d'alliages et de polymères spécialement conçus pour être recyclés (Hildebrandt et al., 2017; Tawada and Sahashi, 2017).

Design-2-Life

Le « Design-2-Life » est un concept très récent qui consiste à considérer, dès la phase de conception, qu'un produit puisse avoir plusieurs vies (au moins 2). Selon (Foster et al., 2014), les utilisations du produit, sur ses différentes vies, ne sont pas nécessairement identiques les unes aux autres, mais doivent tout de même être assez proches. En effet, même si les critères de performances peuvent être complètement différents, le produit doit remplir les mêmes fonctions (Bauer et al., 2016). Par exemple, une batterie stockera toujours de l'énergie qu'elle soit utilisée dans une voiture électrique ou pour des panneaux solaires (Brissaud and Zwolinski, 2017).

Le « Design-2-Life » est une conception proche de celle de la réutilisation, excepté que cette première est plus complexe à mettre en place, car il faut envisager d'autres façons d'utiliser un produit que celle pour laquelle il est conçu à l'origine.

Bien que de nombreux travaux s'intéressent à la question de la prise en compte du développement durable et de la fin de vie d'un produit dès la phase de conception, au lieu d'attendre sa fin de vie, ceux-ci sont encore trop peu mis en applications. (Balanca et al., 2014) expliquent ce phénomène par les conflits engendrés au niveau de la politique environnementale et économique des entreprises. En effet, éco-concevoir en pensant à la fin de vie du produit implique un investissement plus conséquent pour les entreprises, tant sur le plan financier que temporel. Dans le même temps, avec les directives et réglementations imposées par les instances étatiques, les industriels se voient dans l'obligation de tout mettre en œuvre pour réduire l'impact environnemental, sous peine d'amendes.

L'écoconception est une orientation intéressante pour le développement durable et l'économie circulaire, car grâce à elle, il est possible de réduire une partie des impacts de l'Homme sur l'environnement avant même que le produit ne soit utilisé. En ayant une vue d'ensemble des différentes phases que le produit traverse au cours de sa vie, il est possible de concevoir en fonction de l'environnement, de concevoir pour aller au-delà d'un simple cycle de vie (cas actuel). De même, grâce aux recherches portant sur les différentes phases du cycle de vie, les concepteurs ont à disposition de bonnes bases pour obtenir et extraire des exigences répondant au développement durable et à l'économie circulaire.

2. Fabrication et Exploitation

Les phases du cycle de vie produit concernant la fabrication et l'exploitation du produit sont encore peu développées dans la littérature en termes de développement durable. Pourtant celles-ci ont un impact non négligeable sur la quantité de déchets produit par les entreprises.

En effet, lors de la fabrication d'un produit, les matières brutes sont façonnées, transformées, usinées... créant à chaque étape des pertes de matières (sous-produits). A cela, s'ajoute les produits mis au rebut pour non-conformité. Lors de la phase d'exploitation d'un système, celui-ci doit être entretenu pour maintenir un certain niveau de performances, de qualité des produits et de disponibilité.

Des recherches ont été menées afin d'aider les entreprises à mieux gérer leurs lignes de production et leurs consommables, et les déchets qui en résultent (Hassine, 2015; Kerbrat et al., 2013).

2.1. *Cleaner Production*

La « Cleaner Production » est une approche issue directement des idées défendues par l'écologie industrielle (Fronzel et al., 2007). Cette approche consiste à produire plus propre sur le long terme, c'est-à-dire, à réduire le nombre de déchets produits et les émissions produites, à réduire la consommation de matières premières et d'énergies, tout en maximisant le rendement de production (Kjaerheim, 2005; Nielsen, 2007; Zeng et al., 2010). En somme, il s'agit de produire de manière efficiente.

Pour cela, les entreprises réalisent, le plus souvent, des analyses de cycle de vie afin de déterminer sur quels éléments elles vont pouvoir agir. D'autres outils, tels que « Total Quality Management », ISO 9000, ISO 140001, « Eco-Management and Audit Scheme », « Total Quality Environmental Management » et « Six Sigma » (Lopes Silva et al., 2013), sont utilisés pour identifier les éléments litigieux et pour trouver des solutions adaptées à chaque problème relevé.

Un autre moyen de parvenir à réduire la consommation énergétique et les déchets est d'améliorer sans cesse (application de la roue de Deming) l'organisation des entreprises et la technologie utilisée (achat de systèmes plus performants, moins énergivores...) (Baas, 1998). Toutefois, cette stratégie demande un investissement financier conséquent et récurrent que seules quelques grandes entreprises peuvent se permettre, notamment focalisé sur la mise à niveau d'un point de vue technologique. De plus, en changeant de technologie régulièrement, cela engendre de nouveaux déchets qu'il faudra traiter (produits obsolètes).

En reprenant les principes de bases d'une production traditionnelle mais en y ajoutant une composante environnementale, l'approche « Cleaner Production » peut facilement être mise en place par les entreprises, notamment concernant les gaspillages de consommables. Toutefois, pour qu'elle soit réellement efficace, les entreprises doivent réaliser des études poussées sur leurs procédures de fabrication, d'entretien... et les remettre en question le cas échéant.

2.2. Maintenance et Développement Durable

Les approches liant maintenance et développement durable sont peu nombreuses. L'approche la plus couramment développée est celle de la « Green Maintenance ». Cette approche consiste à éliminer tous les déchets produits et associés à la maintenance (Pires et al., 2016), en pratiquant la prévention de la pollution, la réduction du nombre de produits toxiques utilisés, et en s'appuyant sur la « Design for Environment ». En d'autres termes, la « maintenance verte » reprend les principes de la « Cleaner Production » mais les appliquant spécifiquement au processus de maintenance. Les méthodes et outils proposés pour la maintenance verte s'appuient sur une prise de décision multicritères et sur des exigences spécifiques à cette maintenance (compatibilité environnementale, efficacité énergétique, risques pour la santé et la sécurité humaine) (Ajukumar and Gandhi, 2013).

D'autres travaux s'intéressent à l'utilisation des outils de la maintenance pour prédire l'instant où un système ne pourra plus être remanufacturé. En ce sens, (Song et al., 2015) proposent d'étudier le composant le plus critique du système pour déterminer cet instant. (Hu et al., 2015) proposent quant à eux de choisir le processus de fin de vie en s'intéressant à la RUL (Remaining Useful Life) du système.

Les compétences de la maintenance sont encore très peu exploitées dans le cadre du développement durable alors que ce processus est un élément important pour maintenir,

par exemple, le potentiel de réemploi que les produits possèdent à la sortie du processus de fabrication, et qui a été défini lors de la phase d'écoconception.

De par la difficulté à identifier les points à améliorer/modifier pour réduire les impacts environnementaux des phases de fabrication et d'exploitation, les travaux se contentent de proposer des méthodes permettant de réduire les déchets générés par ces phases.

3. Fin de Vie – Recyclage

De manière générale, lorsqu'un produit arrive en fin de vie, il est recyclé que ce soit pour ces fonctions ou ces matières (Godichaud, 2009). En effet, le terme « recycler » signifie « mettre dans un nouveau cycle », ce qui induit une idée de réutiliser à nouveau tout ou partie du produit. Cependant, dans la littérature, le terme recyclage est employé pour parler de la valorisation matière. Ainsi, afin de ne pas faire d'amalgame entre les différents emplois du terme recyclage et les travaux que nous proposons sur la régénération, nous restreignons le recyclage à la valorisation matière.

A l'image de la phase de conception, la phase de fin de vie du produit fait l'objet de nombreuses recherches, méthodes et outils afin de déterminer la meilleure manière de valoriser un produit en fin de vie (déchets).

3.1. *Waste Management*

La problématique de la gestion des déchets prend de plus en plus d'ampleur au sein de la communauté scientifique. En effet, cette gestion couvre l'ensemble de la fin de vie du produit en collectant les déchets, en les transportant, en les traitant, et en les réutilisant ou en les éliminant.

(Karmperis et al., 2013) montrent que les modèles actuels de gestion de déchets se répartissent en 3 catégories : analyse des coûts/bénéfices, analyse du cycle de vie, et techniques multicritères :

- l'analyse des coûts/bénéfices (CBA) : a pour principe d'évaluer les effets positifs et négatifs d'un ensemble de scénarios sur l'économie en mettant tous les impacts sous la même unité de mesure, à savoir la monnaie (Karmperis et al., 2012).
- l'analyse cycle de vie (ACV) : se focalise sur l'étude des aspects et des impacts environnementaux potentiels dans l'objectif d'éliminer un maximum de déchets (Ayres, 1995).
- l'analyse de décision multicritères (MCDM) : a pour objectif d'assister les décideurs en identifiant plusieurs alternatives à un problème en s'appuyant sur une évaluation de plusieurs critères (Huang et al., 2011).

Chacune de ses analyses a ses propres forces et faiblesses (Morrissey and Browne, 2004). Toutefois, celles-ci peuvent être maximisées (forces) ou bien minimisées (faiblesses) en les combinant, soit deux à deux (Linkov et al., 2006; Tudela et al., 2006), soit toutes ensembles (Carter and Keeler, 2008; Duinker and Greig, 2007; Karmperis et al., 2012).

La gestion des déchets est une des étapes les plus importantes dans la circularité des produits, et ne doit pas être négligée. En ce sens, et bien que cette pratique existe depuis plusieurs décennies, des outils continuent à être développés pour répondre au mieux aux normes et aux exigences fixées par les gouvernements.

3.2. Closed Loop Supply Chain et Reverse Logistic

La Closed-Loop Supply Chain (CLSC) correspond à l'idée de créer des boucles entre la supply chain classique et la supply chain inverse (celle qui va alimenter la supply chain classique). La CLSC se focalise sur le contrôle et le fonctionnement d'un système afin de maximiser la création de valeur sur le cycle de vie complet d'un produit avec récupération dynamique de la valeur à partir de différents types et volumes de retours dans le temps (Govindan et al., 2014; Guide and Van Wassenhove, 2009; Souza, 2013).

La CLSC inclut les activités traditionnelles de la supply chain, plus des activités additionnelles (permettant au fabricant de capturer de la valeur supplémentaire) de la supply chain inverse, à savoir (Guide et al., 2003) :

- L'acquisition des produits (obtenir les produits auprès des consommateurs),
- La logistique inverse (gérer les flux de consommateur vers le producteur),
- L'essai, le traitement et l'élimination (déterminer l'état du produit et l'option de réutilisation la plus adaptée économiquement parlant),
- La rénovation (permettre d'obtenir l'option la plus adaptée parmi la réutilisation directe, la réparation, la refabrication, le recyclage et l'élimination (Bufardi et al., 2004)),
- La revente (créer et exploiter les marchés pour les biens refabriqués et les distribuer).

Dans la littérature, les recherches les plus importantes portent sur la logistique inverse (reverse logistics en anglais, RL). Celle-ci est abordée selon 4 catégories mises en avant par (Pokharel and Mutha, 2009) :

- Incitation auprès des utilisateurs finaux à retourner les produits aux entreprises de recyclage (Aras et al., 2009; Bergen et al., 2001),
- Mise en place de la RL (Goggin et al., 2000; Guide, 2000; Presley et al., 2007),

- Approfondissement des processus constituant la RL, à savoir, le désassemblage, la coordination, la logistique, l'inventaire, la réparation et l'après-vente (Bentaha, 2014; Guide and Van Wassenhove, 2009),
- Etudes de marchés et recherches de partenaires (Stindt and Sahamie, 2012).

(Govindan et al., 2014) mettent en avant que les outils utilisés dans ces catégories se focalisent principalement sur des modèles stochastiques permettant de modéliser les incertitudes de la RL. Toutefois, ces dernières années, trois nouvelles méthodes commencent à être exploitées, à savoir, la logique floue, l'approche par intervalles et la théorie du chaos (Hasani et al., 2012; Ramezani et al., 2013), permettant de mieux maîtriser la complexité de la mise en place de la RL.

3.3. *Remanufacturing*

Le processus de remanufacturing a donc pour objectif de faire retrouver à un produit ou à ses sous-ensembles un niveau de performance suffisamment acceptable pour pouvoir être réassemblé, de permettre à des matériaux d'être réutilisés avec leur plus haute valeur ajoutée, tout en réduisant les déchets et la consommation de ressources non-renouvelables (Charter and Gray, 2008).

Pour réaliser son objectif, le remanufacturing fait appel à diverses activités telles que le désassemblage de produits, le nettoyage des éléments des produits, le diagnostic des produits et de leurs éléments constitutifs, le réassemblage et le reconditionnement (Hatcher et al., 2011). Certaines de ces activités font l'objet de recherches afin de les optimiser, tant sur le nombre d'actions à réaliser, la durée, le coût, le profit, de réalisation des activités du remanufacturing (Bentaha et al., 2014; Godichaud et al., 2012; Ma et al., 2011). A titre d'exemple, (Bentaha et al., 2016) déterminent des séquences de désassemblage d'un produit, à l'aide de graphes orientés, en fonction d'un paramètre choisi, notamment celui du profit que peut réaliser le processus de désassemblage, et de l'état du produit.

Le remanufacturing est une bonne alternative à la réutilisation directe des produits, mais il impose au produit de conserver un certain niveau de performance pour pouvoir être de nouveau utilisé.

3.4. *Repurposing*

Le repurposing est un concept récent qui s'apparente à la réutilisation, et qui a pour objectif de préserver la valeur ajoutée d'un produit de seconde main en le réutilisant dans d'autres applications que celles pour laquelle il a été conçu (Bauer et al., 2016).

Ce concept est vu comme une alternative à la non-réutilisation directe et au non-remanufacturing du produit. En effet, la réutilisation est conditionnée par le fait qu'un marché existe pour un produit d'occasion. Toutefois, ce produit peut être devenu obsolète depuis sa première mise sur le marché ou avoir de performances ne satisfaisant plus les exigences des clients. Dans l'hypothèse où ce produit ne peut retrouver ses performances à l'aide du remanufacturing, celui-ci est directement recyclé ou valorisé pour produire de l'énergie.

Le repurposing permet donc d'offrir une autre « chance » au produit avant d'être complètement réduit à sa forme matière ou énergie.

3.5. Recyclage et valorisation énergétique

Contrairement aux autres processus cités ci-avant, le recyclage et la valorisation énergétique s'intéressent à la matière et non au produit, et ne permettent pas d'allonger la durée de vie du produit. Pourtant, à l'heure actuelle, ce sont les processus les plus exploités pour traiter un produit en fin de vie.

Le recyclage fait appel à des recherches très spécifiques puisque chaque matériau doit être recyclé de manière différente afin de préserver au mieux ses propriétés physiques et ses qualités. Dans le même ordre d'idée, le recyclage ne se fait que sur un même type de matériaux, les mélanges pouvant altérer la matière finale. Il faut donc à chaque fois procéder à un tri sélectif avant chaque phase de broyage ou de fonte (deux méthodes les plus employées) (ADEME, 2016). Les produits recyclés vont des eaux usées (Tangsubkul et al., 2005) aux déchets toxiques (à faible quantité de toxine) en passant par les déchets usuels inertes (aluminium, carton, gravats, papier (Pati et al., 2008), plastique (Arena et al., 2003), verre, équipements électroniques (Sodhi and Reimer, 2001)...).

La valorisation énergétique est la dernière valorisation avant la mise en décharge du produit. En effet, ce processus s'applique aux déchets qui n'ont pu être réhabilités par les différents processus de la fin de vie. Cette valorisation consiste à récupérer et à utiliser l'énergie produite lors de la combustion ou la méthanisation de ces déchets (ADEME, 2016). Les recherches qui sont menées sur ce sujet concernent principalement la réduction et le traitement des gaz émis lors de l'incinération (Damgaard et al., 2010; Lombardi et al., 2006) ainsi que l'augmentation de la performance énergétique (Giugliano et al., 2011; Zhang, 2006).

Les perspectives d'amélioration de ces deux processus sont très restreintes puisqu'elles se résument aux progrès de la science des matériaux (augmentation du nombre de matières recyclables) et à l'optimisation des opérations transformations.

Les multiples travaux réalisés ces deux dernières décennies montrent bien que le développement durable et l'économie circulaire font partie des préoccupations actuelles, et que leur mise en place dans le milieu industriel représente un réel défi à relever. Cependant, ces travaux sont beaucoup trop déconnectés les uns des autres. Leur seul point commun est la prise en compte du développement durable, alors qu'ils devraient être vus comme un tout, où chacun vient compléter l'autre.

IV. Bilan, Positionnement et Propositions

Dans cette partie, nous nous proposons de mettre en lumière les manques sur la mise en place de l'économie circulaire dans le monde industriel, ainsi que les solutions que nous souhaitons apporter à certains d'entre eux.

1. Bilans

L'économie circulaire est un concept difficile à appréhender, principalement parce qu'il s'oppose au modèle économique actuel, mais aussi parce qu'il s'appuie sur divers courants de pensée, qui sont, eux-mêmes, soutenus par de nombreux concepts, méthodes et outils.

1.1. *Spécification des processus de bouclage et du produit*

L'un des points forts de l'économie circulaire est de s'inspirer de la nature pour, principalement, réduire les déchets produits dans le milieu industriel. En effet, dans la nature, tout fonctionne sous forme de boucles fermées et tout y est transformé. C'est pourquoi de nombreux travaux se sont concentrés sur les moyens permettant de créer des boucles au sein du milieu industriel (écologie industrielle, closed-loop supply chain) et sur les moyens permettant de fermer ces boucles (réutilisation, repurposing, remanufacturing, recyclage).

Toutefois, ces moyens sont développés de manière indépendante et portent, pour l'ensemble, sur la manière d'avoir un meilleur rendement (économique et écologique) au niveau des processus de fin de vie (désassemblage, recyclage de chaque matière et valorisation énergétique). Alors que, pour réduire les déchets et la consommation de matières premières, il faut se concentrer sur le potentiel de réemploi sous toutes leurs formes des produits existants, et spécifier les conditions de ce réemploi. Peu de travaux

portent sur cette question, et ceux qui s'y intéressent restreignent leurs études au remanufacturing et au recyclage.

Pour pouvoir spécifier ces conditions de réemploi, et donc spécifier les processus de réemploi, il faut s'intéresser aux travaux réalisés sur les « Design for X ». En effet, avec les guides proposés dans la littérature, il est possible d'extraire quelques indicateurs, et quelques exigences qu'un produit doit satisfaire pour être transformé par tel ou tel processus de fin de vie.

Outre la spécification des processus de réemploi, un produit doit avoir une spécification adaptée, notamment avec la notion de nutriment proposée par (McDonough and Braungart, 2012). Dans la nature, chaque nutriment joue un rôle particulier et ne peut être transformé/assimilé que par certains organismes bien spécifiques. Il en est de même avec ceux produits par l'industrie, selon leurs spécificités, ceux-ci ne pourront être réemployés par l'ensemble des processus de fin de vie. La spécification du produit est donc primordiale dans la réduction des déchets. D'autant plus que les auteurs de C2C insistent sur le fait qu'un nutriment technique ne doit en aucun cas être remis dans la sphère naturelle.

1.2. Surveillance des produits sur le long terme

Les points précédemment soulevés mettent en évidence que pour transformer un produit et le valoriser au mieux, il est important de pouvoir déterminer si son potentiel de réemploi est toujours satisfait, et si non, de déterminer à quel moment il ne l'est plus ou risque de ne plus l'être.

En effet, dans la littérature, les produits éco-conçus sont identifiés comme sains pour l'Homme et l'environnement au moment de la conception, mais aucune méthode ne permet de savoir si le produit reste « éco » tout au long de sa vie. Une réponse pourrait être apportée à ce point en se focalisant sur un processus quasiment absent de l'écoconception et de l'économie circulaire : le processus de maintenance.

En effet, la maintenance moderne est capable de surveiller et d'évaluer si les produits respectent les exigences fixées par les parties prenantes (concepteurs et entreprises de fin de vie) durant la phase d'utilisation. Cette surveillance permettrait d'aller encore plus loin dans l'idée de l'économie circulaire puisqu'il ne s'agirait plus d'attendre la fin de vie du produit, mais d'arrêter son utilisation dès lors que son potentiel de réemploi est négativement impacté.

En d'autres termes, la maintenance pourrait être un bon soutien à la surveillance des exigences définies lors de la phase de conception d'un produit « éco », et donc de l'économie circulaire.

1.3. Mutualisation des informations/données

L'un des défis majeurs de l'économie circulaire est le partage d'informations entre les entreprises. Cette idée défendue et mise en applications par l'écologie industrielle a montré à plusieurs reprises qu'elle permettait de réduire considérablement les déchets produits par chaque entreprise, notamment parce que la plupart d'entre eux deviennent des « nutriments » pour d'autres entreprises.

Toutefois, cette synergie idéale impose aux entreprises de bien connaître leur flux, de trouver des partenaires et de mettre à disposition de leurs partenaires, leurs flux de données.

Dans le même ordre d'idée, en intégrant la maintenance dans le suivi du potentiel de réemploi des produits éco-conçus et en souhaitant valoriser au mieux un produit, les concepteurs et fabricants devraient fournir à la maintenance et aux processus de fin de vie, les informations concernant la conception du produit (fonctionnalités, exigences système, matières utilisées, nomenclature...).

Ainsi, faire de l'économie circulaire implique de grandes quantités d'informations à partager, puis à traiter. Il n'est, cependant, pas aisé de les obtenir puisque peu d'entreprises sont prêtes à partager leur secret de fabrication, ou que les technologies actuelles ne permettent pas de les obtenir et de les traiter. De plus, pour réduire au mieux l'impact sur l'environnement d'un produit, il faudrait pouvoir choisir la meilleure combinaison entre transporteurs, clients et processus de valorisation du produit, ce qui engendrerait de nouveaux partages de données.

2. Positionnement et Propositions

Le cycle de vie d'un produit est, de manière générale, vu et pensé de façon linéaire, alors que pour tendre vers du durable, le cycle de vie doit être pensé de manière circulaire. Le passage d'un cycle à l'autre n'est pas aisé puisqu'il nécessite de mettre en place de nouvelles approches, et de voir les produits manufacturés autrement que comme des objets devenant irrémédiablement des déchets. Ainsi, la problématique à laquelle nous nous proposons de répondre dans ce manuscrit est la suivante : « **Comment passer d'un cycle linéaire à un cycle circulaire, et garantir cette circularité au travers du temps ?** ».

Une partie de la réponse à cette question a déjà été étudiée par la fondation E. MacArthur (Foundation Ellen MacArthur, 2014), et les courants de pensées et concepts de l'économie circulaire, et concerne la notion de régénération présente dans le milieu naturel. En effet, pour obtenir une circularité du cycle de vie des produits, des boucles doivent être mises en place, en particulier entre les phases de vie d'exploitation et/ou de fabrication des produits. En ciblant la capacité de régénération de la nature, nous souhaitons comprendre les mécanismes des boucles fermées qui existent au sein de la sphère naturelle pour ensuite les appliquer à la sphère technique. Nous parlons alors de régénération industrielle.

La notion de boucles fermées est, certes, déjà présente dans la littérature, au travers des processus de réemploi, mais en parlant de régénération plutôt que de réemploi, nous mettons plus en avant l'idée qu'un produit doit avoir, et doit être pensé/conçu pour connaître plusieurs vies (produit, sous-ensembles, composants). Pour renforcer cette idée de régénération, nous proposons de voir le produit comme un nutriment, que nous appellerons `produit_nutriment`.

En d'autres termes, pour répondre à la première partie de notre problématique, définir et spécifier cette nouvelle phase, nous proposons d'ajouter une phase de vie, la régénération, après celle d'exploitation, afin de faire apparaître différentes boucles fermées au sein du cycle de vie d'un produit. Pour cela, nous nous appuyons sur les différents travaux réalisés sur les processus de réemploi.

Une fois les boucles mises en place, celles-ci doivent être pérennes au travers du temps et pour chaque produit manufacturé. Afin de s'assurer de cette pérennité, nous proposons de voir le processus de maintenance comme le pilier du maintien des possibilités de régénération au travers du temps. En effet, ce processus est le seul qui est capable de connaître les informations sur un produit à tout instant en réalisant des surveillances, des diagnostics, des actions de maintenance,..., afin de maintenir ce produit dans des conditions opérationnelles requises. Il est donc à même de collecter les informations permettant de savoir si un produit est encore ou non régénérable, et de prendre la décision de régénérer ou non. En ce sens, nous proposons de développer un outil d'aide à la décision, ce qui nous permet également de répondre en partie à la deuxième partie de notre problématique.

Pour surveiller la régénérabilité et développer un outil d'aide à la décision, le `produit_nutriment` sortant des phases de conception/fabrication doit être correctement spécifié. Ce besoin est accentué par la nécessité de mettre en place un suivi de l'évolution

des caractéristiques du produit lors de son utilisation (potentiel de régénération). Afin de spécifier le produit, nous pouvons nous inspirer des guides créés pour les « Design for X ». Cependant, les indicateurs qui y sont définis sont génériques, ils doivent être raffinés afin de les appliquer à chaque type de produit pour les évaluer plus facilement lors de la phase d'utilisation et de régénération.

Finalement, grâce ces spécifications, à la mise en place du suivi du produit, et aux capacités de surveillance et de pronostic de la maintenance, il est envisageable d'arrêter l'exploitation d'un produit avant qu'il ne puisse plus être régénéré par un processus de régénération, et ainsi accroître fortement le nombre d'utilisations du produit.

Pour répondre à notre problématique, nous nous plaçons au niveau des phases d'exploitation et de régénération. En effet, nous nous intéressons aux déchets, que nous appellerons produit_déchet, c'est-à-dire, aux produits qui sont issus de la phase d'exploitation et qui arrivent dans la phase de régénération. De plus, ces deux phases sont celles qui ont le plus grand impact sur le potentiel de régénération des produits.

De plus, les autres phases du cycle de vie sont prises en considération dans cette étude. Effectivement, l'écoconception est un processus clé dans la mise en place de la régénération industrielle, puisqu'elle impose de concevoir les produits de sorte qu'ils puissent être régénérés à de nombreuses reprises. De plus, la prise en compte de la régénération d'un produit à n'importe quel moment de sa vie nécessite des échanges d'informations entre les différents acteurs de cette régénération (du concepteur aux processus de régénération).

Des travaux comme le PLM (Product Lifecycle Management) (Kiritsis, 2011) s'attachent à développer des concepts, méthodes et outils logiciels permettant de maintenir les produits industriels sur tout leur cycle de vie. Le PLM a pour objectif de réduire les coûts, les déchets, les délais, et d'améliorer la qualité du produit, en exploitant les données disponibles sur le produit. Cependant, cette discipline ne faisant pas partie de nos compétences, nous partons du principe que ces informations sont échangées sans difficulté le cas échéant.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux différentes recherches réalisées sur la prise en compte du développement durable dans le domaine industriel. Cela nous a permis de mettre en avant que de nombreux modèles et méthodes ont été développés durant les trois dernières décennies mais qu'aucun ne considère le cycle de vie du produit dans son ensemble. Chaque modèle/méthode se focalise sur une phase de vie en particulier.

Toutefois, considérer l'ensemble des phases de vie n'est pas chose aisée puisque de nombreuses parties prenantes sont sollicitées, interviennent à des moments différents sur la vie du produit, et exploitent le produit de manières différentes. Une solution est donc d'imposer une base commune à toutes les parties prenantes, dès la phase de conception, et de mettre en place des méthodes et des outils permettant à chaque partie prenante de connaître le passé, voire le futur, de chaque produit, et de l'exploiter de manière à ce qu'il puisse être réemployé le plus longtemps possible.

Pour mettre en place une telle solution, il faut au préalable définir le paradigme qui en découle, les éléments à considérer et susciter l'intérêt des parties prenantes en leur montrant que ce changement de paradigme peut leur être bénéfique à tous points de vue.

C'est pourquoi, dans le chapitre suivant, nous nous attachons à définir le paradigme de régénération industrielle au travers d'une analogie avec le vivant (biomimétisme), d'identifier les éléments manquants mais nécessaires à cette régénération, et les activités et compétences existantes qui peuvent être exploitées pour la mettre en place.

Chapitre 2 : Paradigme de Régénération

I. Introduction

Le paradigme de régénération a pour objectif de réduire, voire d'annihiler, la quantité de déchets produits par l'Homme, en s'appuyant sur une interaction harmonieuse entre la sphère naturelle (nature) et la sphère technique (industries). Couramment, les « déchets », sont définis par « *tout produit qui n'est plus utilisable par son utilisateur, que ce soit dû à un dysfonctionnement ou à une obsolescence* ».

L'interaction nature-industries existe et elle est toxique pour la nature, puisque nous puisons des matières premières dans la sphère naturelle pour y rejeter ensuite des déchets que nous produisons. Ainsi, pour faire face à une demande croissante des consommateurs, le nombre de produits manufacturés augmente constamment, ce qui induit une augmentation des quantités de matières premières prélevées. De plus, plus le nombre de produits manufacturés augmente, plus la quantité de déchets produits augmente. L'ensemble de ces relations crée un déséquilibre puisque les matières premières disponibles ne sont pas renouvelées et ne cessent de diminuer, tandis que la quantité de déchets ne cesse de croître et de s'amonceler (Brostra, 2017). Ce phénomène est, de plus, accentué par la rapidité d'obsolescence des produits et leur personnalisation qui engendre une surconsommation de matières et d'énergie.

Afin de réduire ce déséquilibre, tout en continuant de satisfaire les demandes des consommateurs en produits finis, il est nécessaire de réduire l'extraction des ressources naturelles et de limiter la quantité de déchets rejetés dans la sphère naturelle. Pour relever ce défi, il faut transformer l'amoncellement de déchets en un gisement en produits à régénérer, sous toutes leurs formes possibles. Ainsi, même si la quantité de déchets augmente, le nombre de produits régénérés augmente, et la quantité de matières premières disponibles se stabilise. La combinaison de ces réductions et l'ajout du réemploi des produits permettent d'espérer de recréer, un équilibre entre sphère naturelle et sphère technique.

Par sa mise en place, le paradigme de régénération vient bouleverser les habitudes des consommateurs et des entreprises, les forçant à penser autrement et à revoir leur façon de faire sur l'ensemble des processus du cycle de vie du produit (conception, fabrication, gestion, maintenance, retrait...).

Ce chapitre a pour objectif de développer le paradigme de régénération et ses implications. Pour cela, la première partie de ce chapitre s'intéresse à l'origine de ce terme, à ce qu'il implique en matière de compétences à développer/modifier, d'impacts sur les habitudes de consommation des particuliers et des industriels, de relations à mettre en

place... La seconde partie s'attache à enrichir une spécification d'un produit pour qu'il puisse être régénéré. En effet, pour faire interagir différentes entités entre elles, il faut connaître leurs besoins et les prendre en compte à chaque phase du cycle de vie du produit. Pour cela, nous nous appuyons sur des exigences d'utilisation et de régénération. La dernière partie de ce chapitre est consacrée au processus de maintenance que nous définissons comme clé pour la régénération. Celui-ci se base sur de nombreuses méthodes et outils qui peuvent être mis au service de la régénération. Nous verrons également dans cette partie que la régénération impacte le processus de maintenance, notamment sur les actions à mener afin de préserver le potentiel de régénération.

II. De la régénération naturelle à la régénération industrielle (Contribution 1)

En langage courant, le terme « régénérer » possède plusieurs significations selon les domaines de spécialité :

- « reconstituer les tissus organiques après destruction »,
- « réformer en ramenant à un état antérieur jugé supérieur », ou encore
- « rendre à une substance ses propriétés initiales, altérées ou modifiées au cours d'un traitement »⁴.

Ce terme met en avant le fait que les éléments, objets, produits ... dégradés, détruits peuvent être remis en état. Ainsi, nous définissons la **régénération** comme étant :

« ensemble d'actions, naturelles ou techniques, pour permettre de redonner un état jugé acceptable (fonctionnel et opérationnel) à un déchet ou à ses constituants ».

Poussé à l'extrême, cela signifie que les déchets n'ont plus lieu d'être, et que tout élément, dont nous ne nous servons plus, peut connaître une nouvelle utilisation. En effet, la notion de déchet est un concept purement humain car, dans la nature, tout élément est transformé pour contribuer à l'équilibre de la sphère naturelle, c'est ce que l'on nomme le réseau trophique (Ramade, 2009).

Dans la suite de cette partie, nous nous inspirons de ce réseau trophique pour le mettre en œuvre au niveau de la sphère technique et détaillons l'ensemble des éléments nécessaires à sa mise en place.

⁴ <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/régénérer>

1. Régénération Naturelle

Le réseau trophique, terme générique pour l'ensemble des chaînes alimentaires, est un parfait exemple de circularité et de régénération reposant sur la notion de « nutriments » (Kormondy, 1969). Les nutriments sont les éléments essentiels à la pérennisation de la vie et se définissent comme étant des :

« substances nutritives pouvant être de nature organique, minérale ou énergétique. »

Un nutriment est donc, par extension, de la nourriture permettant **le maintien en vie** d'un être vivant tout en facilitant son développement au travers du temps (Dauta, 1982). De plus, les acteurs du réseau trophique permettent grâce au maintien de la vie et aux échanges de nutriments de contribuer à l'équilibre du réseau.

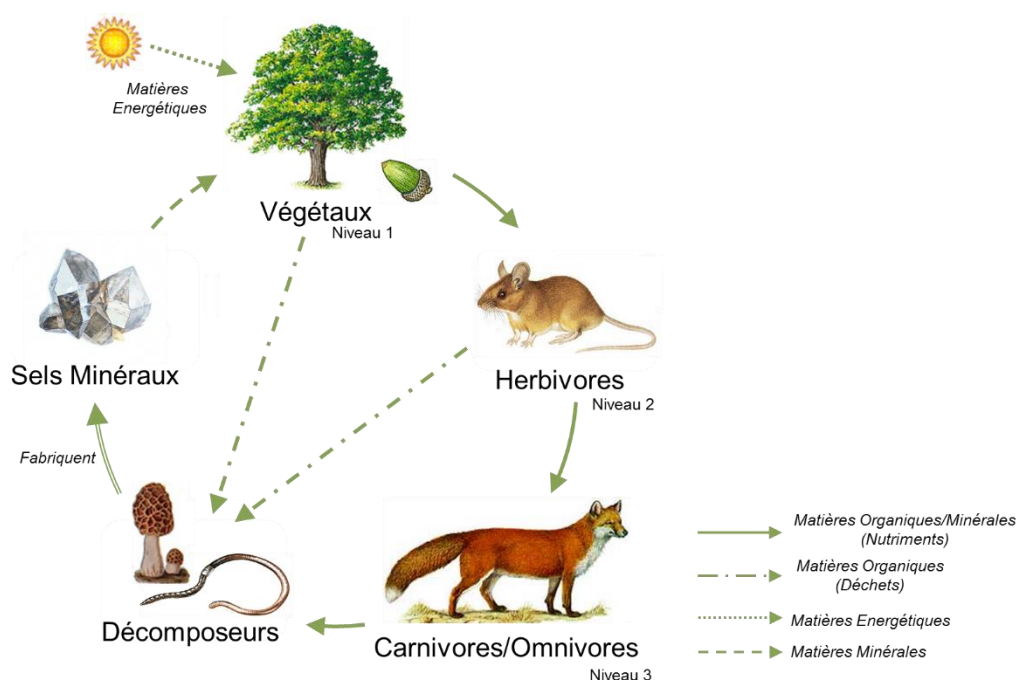


Figure 2.4 - Réseau trophique et échanges de nutriments

Le réseau trophique se compose de plusieurs niveaux hiérarchiques permettant l'échange de nutriments (Figure 2.4), dans l'objectif, pour chaque niveau, de vivre, de se développer et de se reproduire. Au premier niveau, les végétaux se nourrissent de nutriments énergétiques (énergie solaire) et minéraux (sels minéraux et eau). Au deuxième niveau, les herbivores se nourrissent des végétaux (nutriments organiques et minéraux) et sont des nutriments pour nourrir les carnivores. Au niveau 3, les carnivores peuvent se nourrir d'herbivores et de d'autres carnivores (nutriments organiques et minéraux).

Tous ces êtres vivants se reproduisent (ils produisent de nouveaux êtres vivants), se nourrissent des autres êtres vivants de leur environnement, et produisent des matières organiques (déjections, cadavres à la fin de leur vie) qui sont vues comme des « déchets naturels » par ceux qui les produisent car ils ne peuvent plus les utiliser. Cependant, ces matières nourrissent les décomposeurs (vers, bactéries, champignons) (Barbault, 2008), qui produisent des sels minéraux, et servent de nourriture aux végétaux, et le cycle recommence.

Dans ce cercle vertueux, le rôle des décomposeurs est essentiel puisque le bon fonctionnement du cycle repose sur eux. Sans eux, la nature serait recouverte de matières organiques mortes et la vie ne serait plus possible. Les décomposeurs ont pour rôle de dégrader les matières organiques mortes en cassant les liens existant entre les molécules qui composent ces matières, afin d'obtenir des molécules solubles, c'est-à-dire, absorbables par les végétaux (Davet, 1996). Pour cela, on peut considérer qu'il existe plusieurs types de décomposeurs qui transforment les « déchets naturels », chaque catégorie de décomposeurs possède sa propre spécialité, en termes de transformation et de matières à transformer. Ainsi, certains fragmentent les matières organiques mortes en gros morceaux, d'autres fragmentent ces morceaux en plus petits, et d'autres, les fragmentent en molécules (Gobat et al., 2010).

Avant de devenir un nutriment dans la sphère naturelle, un « déchet naturel » doit subir des opérations de déstructuration (broyage, piétinement) puis de décomposition et de digestion des éléments nécessaires à la vie de celui qui consomme le nutriment, et finalement évacuation des autres éléments (Figure 2.5). Ces éléments (déchets naturels) deviennent ensuite des nutriments pour d'autres : nous parlons, ici, de déchets_nutriments. Dans la sphère naturelle, les herbivores, les carnivores/omnivores et décomposeurs sont à la fois acteurs de la déstructuration/décomposition et nutriments des niveaux supérieurs. Chacun de ces êtres vivants est, à la fois, producteur de nutriment et produit (c'est-à-dire un nutriment eux-mêmes).

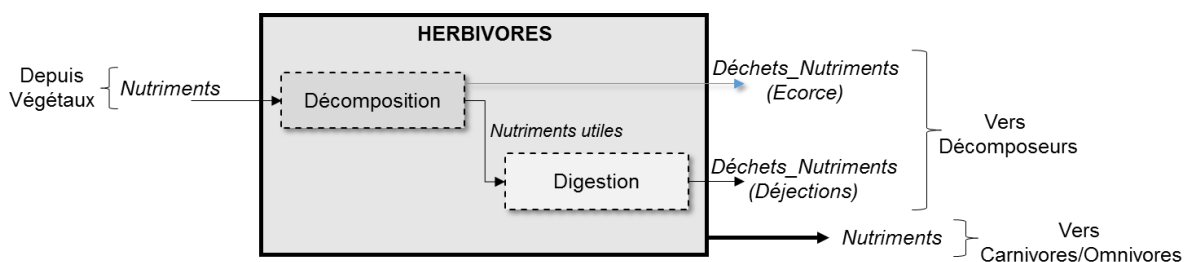


Figure 2.5 - Exemple de transformation de nutriments au sein de la sphère naturelle

La nature étant un exemple d'équilibre, les mouvements du biomimétisme (Benyus, 2011) se sont de plus en plus développés, et nous proposons de nous inscrire dans ce mouvement pour nous inspirer de la nature afin de contrer la linéarité de la sphère technique et le remplissage constant des décharges.

2. Régénération industrielle - Formalisation

En considérant les déchets autrement que comme des éléments inutiles, mais comme des nutriments permettant de nourrir des entreprises et de fabriquer de nouveaux produits, il devient possible de répondre à cet accroissement tout en réduisant notre impact sur la sphère naturelle. Au-delà du simple recyclage, la régénération est une solution à développer au niveau industriel.

2.1. *Application du biomimétisme*

La sphère technique se compose de 3 secteurs d'activités : secteur primaire (extraction des matières premières), secteur secondaire (fabrication des produits) et secteur tertiaire (proposition de services). A ce dernier secteur, nous associons les activités humaines (utilisation des produits ou des matières) qui représentent l'ensemble des activités de consommation, qu'elles soient collectives ou individuelles. Ces différents secteurs et activités puisent des matières premières, fabriquent et utilisent/exploitent des produits ou services qui deviennent ensuite, pour diverses raisons (défaillances, obsolescence, ...) des déchets. Nous ne considérons pas les produits secondaires, sous-produits issus d'une fabrication (copeaux, sciure, ...). Nous nous focalisons uniquement dans cette thèse sur des produits dont la phase d'utilisation se termine. Ainsi, dans cette thèse, le terme « produit » regroupe aussi bien des produits manufacturiers (véhicules, déchets électroniques...) que des équipements de production (machines-outils, chaîne de production...).

2.1.1. Cycle industriel - Linéarité

Contrairement aux acteurs du réseau trophique, les acteurs de la sphère technique ne réalisent pas de déstructuration/décomposition durant leurs activités, car ils extraient des matières premières de la nature, les transforment puis assemblent les produits qu'ils reçoivent en entrée pour en créer d'autres (Assemblage), les qualifient pour les vendre aux industries du secteur tertiaire et à des particuliers (Figure 2.6). Chacun de ces secteurs ne s'intéresse principalement qu'à sa propre activité.

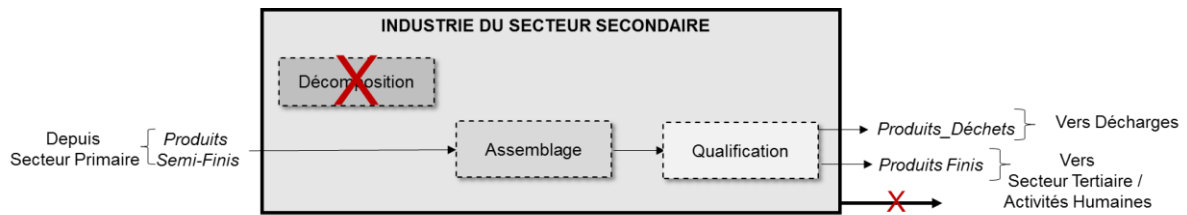


Figure 2.6 - Exemple de transformation de produits au sein de la sphère technique

La Figure 2.6 présente un exemple de transformation du secteur secondaire. Cependant, les acteurs du secteur secondaire ne sont pas « consommés » par le secteur tertiaire comme dans la sphère naturelle, mais les produits qu'ils produisent. Les autres éléments sortant du secteur secondaire, sont souvent stockés dans des décharges, ou exploités par d'autres acteurs. Lors de la réalisation de leurs activités, les secteurs produisent des déchets, sous-produits qui sont consommés par d'autres entreprises sous forme d'énergie (sciure/chaleur) (écologie industrielle),... ou acheminés vers les décharges.

La Figure 2.7 montre que dans cette approche linéaire, les réserves de ressources naturelles ne font que diminuer alors que la quantité de déchets elle ne fait qu'augmenter.

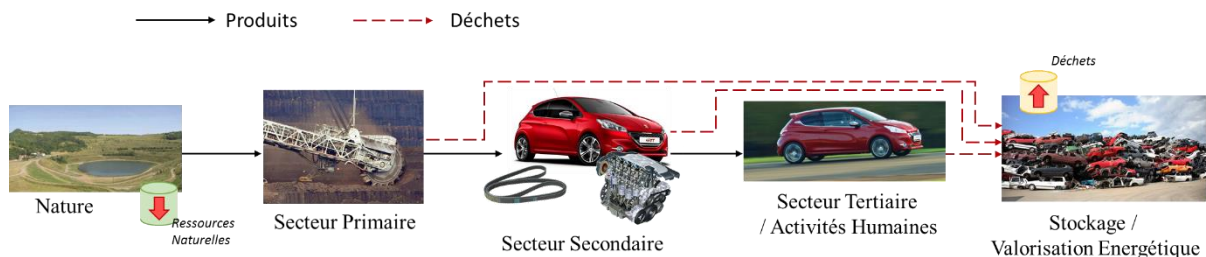


Figure 2.7 - Cycle industriel linéaire

Les décharges, ou centres d'enfouissement, ont pour objectifs de stocker les déchets en minimisant les risques de pollution ou de contamination de l'environnement tout en facilitant leur décomposition, notamment pour les déchets organiques (Vincent, 1991). Les décharges sont réparties en 3 catégories en fonction du type de déchets à stocker :

- inertes (minéraux),
- non dangereux et non inertes (ménagers et assimilés, organiques),
- dangereux.

Pour chacune de ces catégories, les vecteurs principaux de l'évolution des déchets stockés sont l'eau et les décomposeurs. En effet, avec le temps, l'eau provoque l'érosion des déchets, les transformant lentement en particules absorbables et transformables par les décomposeurs naturels (Blanchart et al., 2017). L'avantage des décharges est qu'elles permettent une décomposition plus rapide des déchets inertes et non inertes non

dangereux, que s'ils étaient mis directement dans la nature. Cependant les temps de décomposition restent très longs dans la majorité des déchets.

Les déchets dangereux sont stockés quant à eux dans des centres dédiés (produits chimiques ou radioactifs) en attendant, hypothétiquement, de trouver un moyen technique pour les traiter ultérieurement (ex : déchets nucléaires de Fukushima). Le stockage en couches géologiques profondes tel que le centre de stockage de Bure⁵ est un exemple de ce type de solution.

2.1.2. Cycle industriel - Circularité

Dans un premier temps, nous appliquons une approche biomimétique et nous assimilons les différents secteurs et activités de la sphère technique aux éléments présents dans le réseau trophique. Ainsi, le secteur primaire peut être vu comme des végétaux. Ce secteur extrait les ressources (ex : métaux brutes) dans la nature, tel que le font les végétaux avec les minéraux présents dans le sol, ou l'énergie provenant du soleil. Ils interagissent directement avec la sphère naturelle.

Le secteur secondaire lui peut être vu comme un herbivore, qui se nourrit de ce que produit le secteur primaire (matières premières transformées), à l'image des herbivores mangeant les feuilles produites par les végétaux.

Enfin, le secteur tertiaire et les activités humaines sont vus comme des carnivores, car ils se nourrissent de ce que produisent le secteur secondaire (produits) et le secteur tertiaire (services).

Dans un second temps, nous identifions et faisons émerger les éléments manquants pour approcher du réseau trophique, c'est-à-dire, les minéraux et les décomposeurs. Ainsi, les minéraux sont représentés par l'ensemble des éléments que nous pouvons trouver dans la nature, les ressources naturelles. Les entreprises de recyclage (telles qu'elles sont vues aujourd'hui) font le lien de retour entre le secteur tertiaire et le secteur secondaire et sont assimilées aux décomposeurs, notamment, parce qu'elles transforment des déchets en matières premières secondaires.

On constate donc qu'il manque des acteurs « régénérateurs » dans le « réseau industriel » pour le transformer en réseau trophique, et faire émerger des boucles de retour (circularité). Cependant, les savoir-faire et les technologies au sein de la sphère technique, rendent possible le développement d'acteurs capables de produire des nutriments, pour

⁵ <http://www.andra.fr/andra-meuse/>

l'ensemble des secteurs industriels et la sphère naturelle, à partir des déchets de ces différents secteurs (produits défaillants ou obsolètes) (Figure 2.8).

Ces acteurs ne jouant pas exactement le même rôle que les décomposeurs naturels, nous les appelons, dans la suite de ce mémoire, « **régénérateurs** ». Notons également que nous considérons, dans ce manuscrit, que tout produit venant d'être conçu et exploité pour la première fois par un secteur ou une industrie est un « **produit neuf** ». De même, tout produit sortant d'un régénérateur pour entrer dans un secteur est vu comme un « **produit_nutriment** ». Comme nous le montrons dans le début de ce manuscrit, la notion de déchets n'existe pas dans le paradigme de régénération, ainsi, les déchets seront vus comme des « **produits_déchets** », et le terme « **équipement** » sera parfois utilisé lorsque le produit neuf ou le produit_nutriment est en phase d'utilisation.

Dans nos travaux, nous nous focalisons sur les **équipements de production** exploités par les industriels pour produire des **produits finis** qu'ils soient neufs ou d'occasion. Toutefois, avant d'être exploité, un équipement de production est un produit fini issu d'un équipement de production. Le terme de « **produit** » sera donc rattaché, dans la suite, à des notions de mise en vente (après régénération ou non), de mise en attente d'exploitation. Ainsi lors de la régénération, un équipement de production est de nouveau identifié comme étant un produit car non exploité et devant, in fine, être remis en vente.

A l'image de la fondation Ellen MacArthur⁶, nous proposons d'introduire un régénérateur par type de secteur afin de maximiser les possibilités de régénération des produits_déchets, pour assurer la nutrition des autres secteurs par des produits_nutriments (Figure 2.8). Avec l'ajout des régénérateurs, les produits_déchets ne sont plus envoyés directement en stockage ou en valorisation énergétique, mais sont transformés en produits_nutriments, ce qui permet de diminuer le prélèvement des ressources naturelles disponibles, tout en diminuant progressivement la quantité de déchets. Lorsqu'un régénérateur n'est pas en mesure de régénérer le produit_déchet, celui-ci est envoyé vers le régénérateur se situant en amont. Dans l'éventualité où aucun régénérateur ne peut régénérer le produit_déchet, celui est considéré comme un réel déchet et il est envoyé en stockage ou en valorisation énergétique.

⁶ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr/fondation-ellen-macarthur/la-fondation>

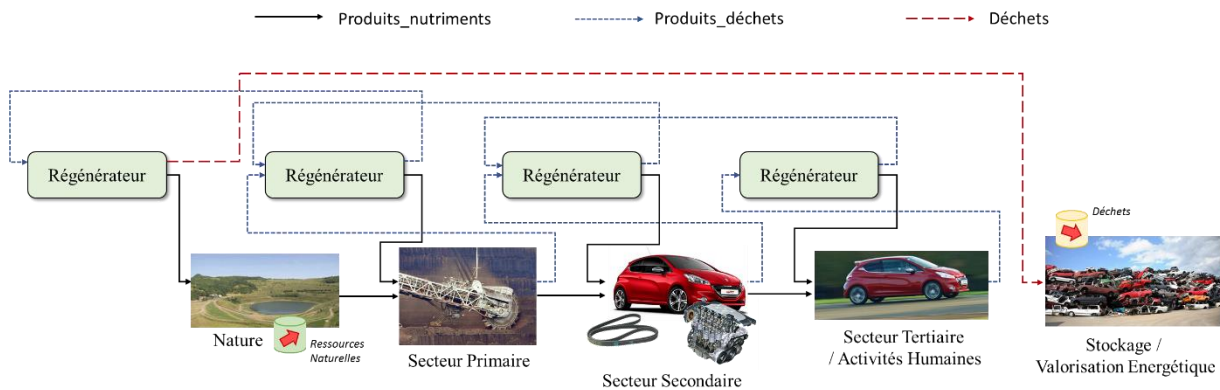


Figure 2.8 - Cycle industriel circulaire : ajout des régénérateurs et des échanges de nutriments

De plus, afin d'avoir une osmose entre la sphère naturelle et la sphère technique, et satisfaire les piliers du développement durable, la nature est vue comme un secteur que les régénérateurs peuvent également nourrir (Figure 2.8). En effet, les extractions de ressources naturelles, mêmes minimales soient-elles, perdurent et réduisent les quantités de ressources disponibles. Il est donc possible d'approvisionner la nature en matières qu'elle pourra transformer afin de créer à nouveau la vie, et donc de nouvelles ressources. Ceci s'applique particulièrement aux matières organiques dont les êtres vivants se nourrissent déjà (bois, fibre de coton, cuir...).

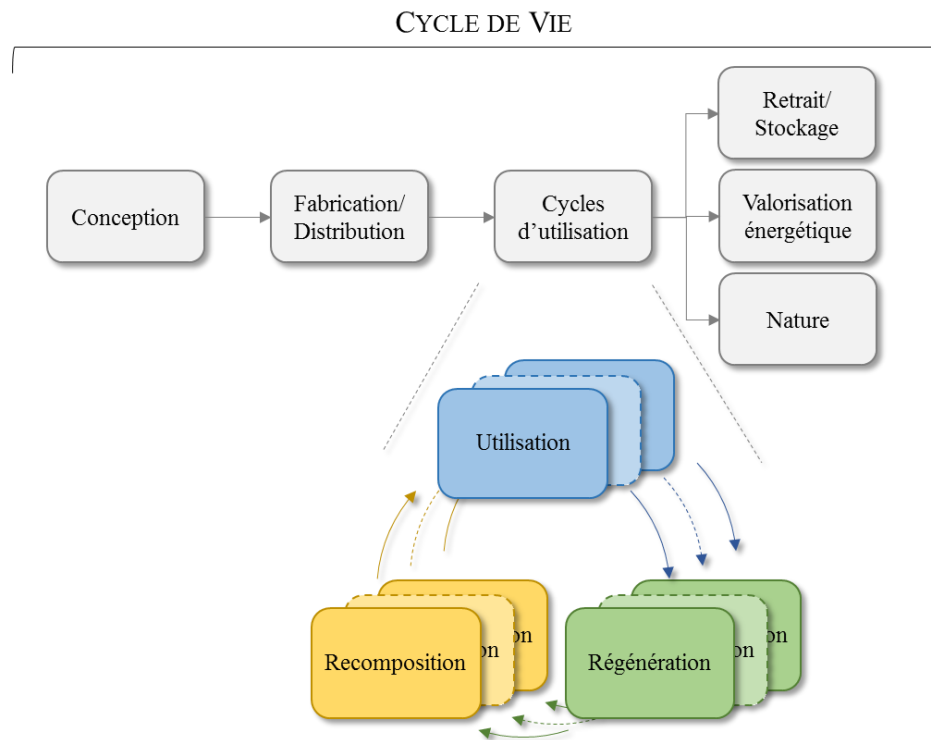


Figure 2.9 - Cycle de vie et cycles d'utilisation

Finalement, en rendant le cycle industriel circulaire grâce à la régénération industrielle, tout produit_déchet (ou éléments de ce produit) peut voir sa durée de vie augmenter. Nous introduisons donc la notion de cycle d'utilisation (Figure 2.9) qui regroupe les acteurs utilisant, régénérant (actions réalisées par les régénérateurs) et recomposant (actions de refabrication ou de repurposing (Bauer et al., 2017), et de remise sur le marché) les produits. Ce cycle est à différencier du cycle de vie d'un produit qui représente la conception, la fabrication, plusieurs cycles d'utilisation, et une fin de vie du produit.

Finalement, la régénération fait apparaître une nouvelle définition de déchets. En effet, en se plaçant d'un point de vue utilisation (vue actuelle), un produit_déchet est « ***un produit qui n'est plus utile à son propriétaire, que ce soit par détérioration, casse ou obsolescence*** ». D'un point de vue régénération, un déchet est « ***un élément technique qui ne peut plus être régénéré dans la sphère technique, qui ne peut plus servir de nutriments pour la sphère naturelle et qui est nocif pour cette sphère*** ».

2.2. Eléments de la régénération

Le paradigme de régénération fait apparaître de nombreux concepts qu'il est important de définir et de comprendre pour faciliter sa mise en place au sein de la sphère technique. Parmi ces concepts, nous abordons : les nutriments, les régénérateurs et les catégories de produits qu'ils peuvent régénérer.

2.2.1. Nutriments

(McDonough and Braungart, 2010) ont identifié deux types de nutriments, les nutriments techniques, qui doivent, pour ces auteurs, rester dans la sphère technique car toxique pour la sphère naturelle et les nutriments biologiques qui peuvent retourner dans la sphère naturelle car sain pour elle. Toutefois ces types sont trop restrictifs et ne prennent pas en compte les nutriments tels que les sels minéraux. C'est pourquoi, dans cette section, nous identifions d'autres types de nutriments.

Les nutriments se rapportent à l'ensemble de ce qui est produit par la nature ou par l'industrie. En d'autres termes, tous les produits que nous utilisons, les chutes et rebuts qui résultent de leur fabrication, les produits usagés, détériorés, obsolètes, ..., doivent être considérés comme des nutriments potentiels.

Pour conserver l'harmonie avec la nature, certains de ces nutriments sont remis dans la sphère naturelle, tandis que d'autres restent dans la sphère technique. En effet, seuls ceux qui sont absorbables par la nature et non nocifs, voire bénéfiques, peuvent y retourner. Il faut parfois transformer certains éléments avant de les rejeter, de manière à faciliter leur absorption. Par exemple, au lieu de remettre un morceau de bois dans la nature, celui-ci est transformé en copeaux voire en sciure qui se décomposera plus vite. De plus, il ne faut pas que la quantité remise dans la nature engendre un déséquilibre. Il faut redonner à la nature avec parcimonie et en des lieux différents afin qu'elle ne se retrouve pas avec un excédent de matières à traiter.

Les nutriments assimilables par la nature sont les nutriments naturels (Figure 2.10). Ce type de nutriments se compose de deux catégories, les nutriments organiques et les nutriments minéraux (Diez et al., 2015). Les organiques concernent l'ensemble des nutriments à base de matières organiques telles que le bois, le coton ou le cuir. Les minéraux concernent les nutriments à base de matières inorganiques tels que les terres rares. Bien que naturelle, cette dernière catégorie n'a, cependant, pas vocation à retourner dans la nature car son extraction est trop néfaste pour l'environnement, et il est donc préférable de recycler ces matières au lieu d'en extraire à nouveau de la nature. Nous considérons donc que les nutriments minéraux doivent rester dans la sphère technique le plus longtemps possible, tout comme les nutriments techniques.

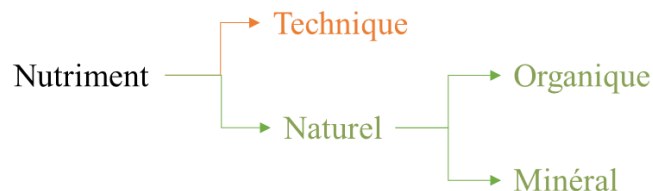


Figure 2.10 - Types de nutriments

Afin de traiter ces différents nutriments et les remettre dans un cycle d'utilisation qui leur est le plus approprié, il faut mettre en place des processus de régénération dédiés à chaque produit.

2.2.2. Régénérateurs

Les régénérateurs ont pour mission de redonner un potentiel d'utilisation, au travers de transformations, à tout ou partie d'un produit_déchet.

2.2.2.1. Entrées/sorties

Un régénérateur reçoit en entrée des produits_déchets venant de fournisseurs et produit, en sortie, des nutriments (produits_nutriments) qui nourrissent des clients

(Figure 2.11). Les fournisseurs et clients sont des acteurs de la sphère technique de même secteur d'activité ou de secteurs différents. Pour être viable d'un point de vue économique (pilier Eco du Développement Durable), la production de produits_nutriments est en réponse à une demande émise par un acteur client du réseau industriel.

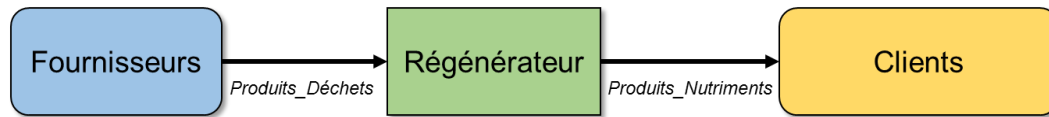


Figure 2.11 - Régénérateur - Entrées/Sorties de produits

En fonction des produits_déchets (produits en entrée du régénérateur) et des produits_nutriments (produits en sortie du régénérateur), les transformations à réaliser sur ceux-ci ne sont pas les mêmes. Certaines opérations agissent sur la fonctionnalité du produit_déchet et permettent de conserver sa fonctionnalité, tandis que d'autres permettent de ne conserver que celles de ses constituants et d'autres, encore, ne conservent aucune des fonctionnalités du produit ni de ses constituants.

2.2.2.2. Fonctions des régénérateurs

En s'inspirant des transformations naturelles et des activités non prises en charge par les secteurs industriels, nous associons trois fonctions aux régénérateurs (Figure 2.12) :

- Fonction de **décomposition** (pris en charge dans le réseau trophique par les décomposeurs) des produits_déchets, et que ne remplissent pas les secteurs d'activités,
- Fonction de **remise en état** des produits_déchets,
- Fonction de **requalification** des produits_nutriments en vue de leur remise sur le marché.

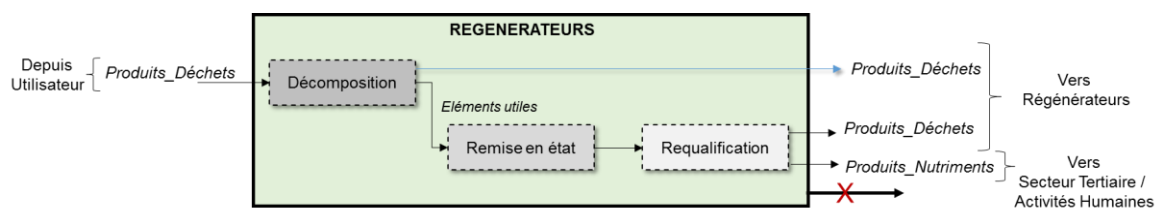


Figure 2.12 - Exemple de transformation de produits_déchets au sein de la sphère technique en tenant compte de la régénération

Pour réaliser la transformation sur le produit_déchet entrant et le remettre dans un nouveau cycle d'utilisation, ces fonctions s'appuient sur deux types d'activités : de **diagnostics** et d'**actions de régénération**.

Diagnostics

Les activités de diagnostic sont présentes au niveau des fonctions de décomposition et de remise en état.

Diagnostic de Décomposition

L'activité de diagnostic de décomposition permet de déterminer si le produit_déchet peut être décomposé par le régénérateur, c'est-à-dire, s'il est possible de soustraire le produit_déchet à son environnement (enlèvement de son lieu d'exploitation), ou d'accéder à ses constituants ou à ses matières...

Diagnostic de Remise en état

L'activité de diagnostic de remise en état permet de connaître l'**état de santé** des produits_déchets reçus des fournisseurs. L'état de santé d'un produit_déchet se caractérise par des indicateurs de performances (accomplissement de la fonction), de dégradations (niveau d'évolution des mécanismes de dégradations) et de contexte (variations des indicateurs de performances et de dégradations dans un milieu donné). Dans (Abichou, 2013), l'auteur développe le concept d'état de santé pour la maintenance que nous adoptons dans notre travail.

Dans le cadre de la régénération de produits_déchets, nous nous intéressons en premier lieu aux indicateurs de performances, que nous appellerons **état technique**, auxquels nous ajoutons des indicateurs portant sur l'**aspect physique** du produit. Ainsi, dans nos travaux, l'état de santé se décline selon deux composantes : un **aspect physique** et un **état technique**. Pour les éléments de contexte signalés dans le travail de (Abichou, 2013), nous verrons, par la suite, qu'ils sont considérés dans un premier temps comme inconnus, puisque nous considérons un flux de déchets (sans traçabilité de leur vie antérieure). On verra dans un second temps que ces éléments de contexte pourront être pris en compte en changeant la logique de travail entre les régénérateurs et leurs fournisseurs.

L'activité de diagnostic de remise en état permet aux régénérateurs de déterminer s'ils ont la capacité ou non de régénérer le produit_déchet entrant, puis d'identifier les actions de remise en état à réaliser. Un produit_déchet estimé non régénérable par le régénérateur est envoyé vers un autre régénérateur qui pourra valoriser par exemple ses composants ou sa matière. Un déchet estimé régénérable subit différentes actions de régénération lui permettant de devenir un produit_nutriment.

Chaque diagnostic vise à quantifier le niveau de satisfaction des exigences originelles de conception (fonctionnelles, performances, opérationnelles, interfaces) et de fabrication

du produit_déchet (aspect physique, ...). Le diagnostic consiste à réaliser séquentiellement un diagnostic sur l'aspect physique puis sur l'état technique, si le premier est satisfait. Si le diagnostic sur l'état technique est, à son tour, satisfaisant, le produit_déchet peut être remis en état. Pour certains produits_déchets, seul l'état technique importe. Dans ce cas, les exigences associées à la satisfaction du diagnostic sur l'aspect physique sont moindres, voire inexistantes. Ces diagnostics sont réalisés grâce à des **procédures de tests** propres à chaque type de régénérateurs et à chaque type de produits_déchets à régénérer. Ils peuvent s'appuyer sur les procédures et moyens techniques utilisés lors du contrôle qualité de fabrication du produit neuf.

Suite à ces tests, le produit_déchet est classé dans différentes classes correspondant à des niveaux de satisfaction des exigences du produit ou de ses constituants. La **classification** peut s'opérer selon plusieurs niveaux allant du NEUF à NON REUTILISABLE. A titre d'exemple, dans le domaine de la téléphonie les appareils sont classés selon 3 niveaux : A, B et C. Un niveau est associé à l'aspect physique et à l'état technique (Figure 2.13). A signifie que le produit_nutriment répond à un aspect physique et/ou un état technique proche de ceux du neuf (très bon état, aucune trace d'utilisation). B signifie que les états du produit_nutriment se rapprochent de ceux du neuf, mais peuvent avoir quelques défauts (état correct, légères rayures, bosses, décolorations...). C signifie que le produit_nutriment est en état de fonctionner mais avec des performances moindres et sans avoir l'aspect d'un produit neuf (état moyen).

Le niveau de classement traduit également l'effort à produire pour régénérer le produit_déchet. Cet effort est plus ou moins important selon la différence de classe du produit_déchet en entrée et celle souhaitée pour le produit_nutriment en sortie.

		Classe		
		Etat Technique		
		A	B	C
Classe Aspect Physique	A	A	B	C
	B	A	B	C
	C	B	B	C

Figure 2.13 - Exemple de matrices de classification de l'état de santé du produit_déchet/nutriment

A partir de la différence entre l'état de santé du produit_déchet entrant et l'état de santé souhaité pour le produit_nutriment, et de la valeur ajoutée économique ciblée, le régénérateur peut déterminer les actions de remise en état à effectuer.

Actions de régénération

Les actions de régénération des produits_déchets se décomposent en trois types :

- ***Actions de Décomposition***

La décomposition regroupe les actions techniques permettant d'accéder aux déchets ou à ses constituants en fonction du type de régénérateurs.

- ***Actions de Remise en état***

La remise en état regroupe les actions permettant de redonner aux produits_déchets les caractéristiques pour répondre aux exigences du client. Lors de la remise en état de ces produits, certains éléments peuvent être remplacés et suivent, à leur tour, le processus de régénération. Des actions de clôture sont également réalisées, et consistent à reconstituer le produit_nutriment, à le reconditionner en vue d'une remise sur le marché.

- ***Actions de Requalification***

La requalification se fait en fin de remise en état, et fait appel aux mêmes compétences que celles déployées lors des activités de diagnostic. Cette activité permet de vérifier que le produit_nutriment est conforme aux exigences fixées par les clients, et de lui associer une classe avant sa remise sur le marché. Une durée de garantie peut également être déterminée, à partir d'un retour d'expériences (REX) sur les précédents produits_nutriments régénérés. Nous ne développerons pas directement ce point dans ce mémoire.

Ces différentes activités sont réalisées au sein de quatre types de régénérateurs que nous avons dénommés pour les distinguer selon leur niveau d'intervention (équipements, sous-ensembles, composants, matières) : **déconnecteurs**, **désassembleurs**, **déstructurateurs** et **détechnifieurs**. Les appellations choisies contiennent toutes le préfixe « dé », pour faire référence à la séparation (décomposition), tandis que le suffixe porte sur le niveau auquel fait référence la séparation. Ainsi, déconnecteur concerne la séparation du produit_déchet de son contexte d'utilisation, désassembleur, porte sur la séparation des constituants du produit_déchet (sous-ensembles, composants), déstructurateur indique que l'on sépare les matières et enfin détechnificateur, que l'on se sépare de la sphère technique pour retourner dans la sphère naturelle. Le préfixe « dé » fait également référence à la première fonction présentée dans la Figure 2.12. Dans les paragraphes suivants, nous allons reprendre et expliciter chacun d'entre eux.

2.2.2.3. Processus de déconnexion- Déconnecteurs

Les déconnecteurs ont pour objectif de remettre en état un produit_déchet entrant afin qu'il connaisse un nouveau cycle d'utilisation en conservant la fonction de celui-ci (produit_nutriment) (Figure 2.14). Les déconnecteurs restent au niveau du produit, pour lui redonner une vie supplémentaire et augmenter la durée d'utilisation. C'est le cas classique du matériel d'occasion ou de seconde main.

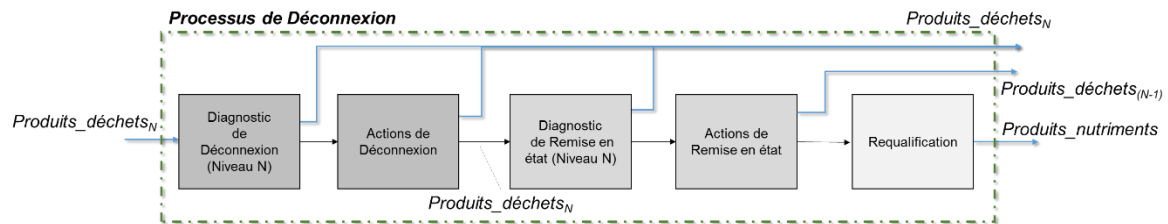


Figure 2.14 - Activités de processus de déconnexion

La fonction de décomposition (diagnostic de déconnexion et actions de déconnexion) portant sur la déconnexion du produit_déchet de son environnement n'est pas toujours réalisée par le régénérateur, mais le plus souvent par l'utilisateur du produit. Le régénérateur doit déterminer l'état de santé du produit_déchet quant à la possibilité de le régénérer ou non, via un diagnostic de remise en état.

Le diagnostic de remise en état, c'est à dire l'évaluation de l'état de santé du produit_déchet débute par l'évaluation de l'aspect physique qui se fait par le biais de tests manuels, ou automatiques, de contrôles visuels, ... (ex : présence de tous les éléments du produit, bon état des interfaces, bon état de surface...).

Dans un second temps, l'évaluation de l'état technique peut se faire par le biais de tests sur la fonctionnalité du produit, de tests sur ses performances, de tests de ses interfaces, sous la forme de tests spécifiques tels que des tests mécaniques (ex : contrôle de la bonne rotation des axes, contrôle des éléments permettant de fixer les sous-ensembles entre eux...), ou de tests électriques (contrôle de la continuité, contrôle de l'isolement...).

Les actions de remise en état sont identiques à celles réalisées classiquement dans le cadre d'une maintenance (corrective ou préventive) sur les équipements. On retrouve des actions de nettoyage, de désassemblage, de remplacement d'éléments défectueux, de réassemblage... Pour le remplacement des sous-ensembles ou des composants défectueux, il est recommandé d'utiliser des éléments régénérés équivalents.

Les entreprises de reconditionnement de téléphones sont des exemples actuels de ce type de régénérateurs. Nous pouvons citer l'exemple de la société Remade⁷. Cette société

⁷ <https://www.remadeinfrance.com/>

achète des lots de téléphones usagés à des opérateurs téléphoniques ou des partenaires commerciaux (FNAC). Certains téléphones sont reconditionnés, les autres sont cannibalisés pour en extraire des pièces de rechanges utilisées en interne dans la société ou vendues à des clients. Les composants non réutilisables sont revendus à des déstructurateurs.

2.2.2.4. Processus de désassemblage – Désassembleurs

Lorsque le déchet ne peut pas être régénéré par un déconnecteur pour des raisons techniques ou économiques, il faut valoriser ses constituants. Ainsi un désassembleur a pour objectifs de désassembler un produit_déchet (niveau N) pour accéder à ses sous-ensembles et constituants (Niveau N-1, N-2...). Les déchets du niveau N doivent obligatoirement être désassemblés en conservant les interfaces et les fonctionnalités des éléments de niveau N-1. Ces produits_déchets de niveau N-i sont ensuite remis en état lorsque cela est possible. Après régénération, ils deviennent des pièces détachées pour le même produit de niveau N (remanufacturing) ou pour d'autres produits (repurposing (Bauer et al., 2017)).

Cinq étapes composent ce régénérateur (Figure 2.15) :

- Diagnostic de désassemblage sur le niveau N afin de déterminer si ce régénérateur est en capacité de le désassembler,
- Actions de désassemblage du niveau N en niveau N-1,
- Diagnostic de remise en état sur le produit de niveau N-1 afin de déterminer s'il est possible de les remettre en état,
- Actions de remise en état des produits N-1,
- Requalification des produits N-1 avant remise sur le marché.

Cette décomposition en niveaux N et N-1 est récursive et peut être prolongée sur les différents niveaux de la nomenclature d'un équipement.

L'hypothèse faite dans la Figure 2.15 est que l'état de santé du produit_déchet en entrée n'est pas connu, et nécessite donc une première activité de diagnostic pour savoir s'il est désassemblable.

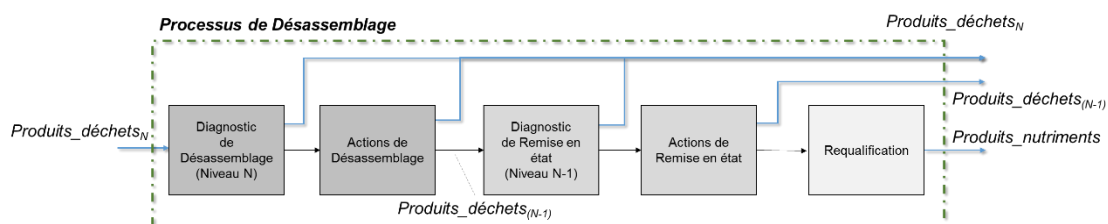


Figure 2.15 - Activités du processus de désassemblage.

L'évaluation de l'état de santé des produits du niveau N-1 est identique à celle réalisée par un déconnecteur. Il en est de même pour les actions de remise en état et de requalification. Notons que le désassembleur peut s'intéresser à tous les niveaux de décomposition d'un produit_déchet autres que le niveau initial du produit_déchet. Ainsi, le désassemblage des différents niveaux pourra soit être effectué par un même régénérateur, soit par plusieurs régénérateurs spécialisés par niveau de décomposition.

A titre d'exemple, la loi récente (LOI 2015-992 - Am.798, 2016) sur l'obligation faite aux garagistes de proposer aux clients des devis de maintenance exploitant des pièces de rechange d'occasion a engendré dans le monde automobile une transformation des entreprises artisanales de « casses automobiles » en des entreprises industrielles, capables de fournir un flux conséquent de pièces de rechanges, testées et garanties. Dans ce cadre, les méthodes de travail ont considérablement évolué et tendent vers des pratiques industrielles du même niveau que celles adoptées en fabrication de pièces neuves (procédures, formations, matériels spécifiques de démontage, bancs de test, conditionnement). Nous pouvons citer comme exemple la société INDRA⁸ qui désassemble des voitures en pièces détachées requalifiées. Des outillages spécialisés ont été développés (SEDA) pour faciliter le désassemblage ou la dépollution, des véhicules et l'accès aux pièces détachées.

2.2.2.5. Processus de déstructuration - Déstructurateurs

Lorsque le produit_déchet, ou ses constituants_déchets ne sont pas régénérables par les deux régénérateurs précédents, ils doivent être traités par un déstructurateur.

Un déstructurateur a pour objectif de récupérer les matières d'un produit_déchet afin de les revendre en tant que matières premières secondaires (MPS). En détruisant le produit_déchet, le déstructurateur détruit par la même occasion la fonctionnalité de tous les produits_déchets des niveaux inférieurs. Cependant, la diversité des matières impose préférentiellement de décomposer le produit_déchet en ses constituants élémentaires pour faciliter leur tri et leur revalorisation.

L'action de désassemblage est complétée pour une action de déstructuration, c'est-à-dire, du tri et du broyage (Figure 2.16). La remise en état des matières obtenues après broyage consiste à les nettoyer de leurs substances parasites, à les dépolluer, à ajouter de la matière première primaire (par opposition à secondaire), à les conditionner sous la forme exigée par les clients (pastilles, copeaux, ballots...).

⁸ <http://www.indra.fr>

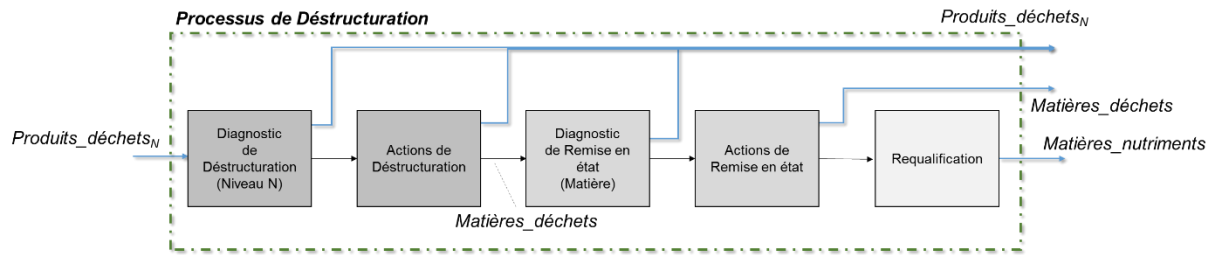


Figure 2.16 - Activités du processus de déstructuration

Nous pouvons citer en exemple, le groupe PAPREC qui collecte, recycle les déchets industriels et ménagers, et revend les matières premières secondaires obtenues à des fonderies, des sidérurgies, des verreries, des entreprises de transformation du plastique...

2.2.2.6. Processus de détechnification– Détechnificateurs

Un détechnificateur est le régénérateur faisant le lien entre la sphère technique et la sphère naturelle. Son unique client est la nature. C'est pourquoi, il a pour objectif de transformer un déchet en matière absorbable par la nature, c'est-à-dire, faciliter l'activité de fragmentation mécanique aux décomposeurs naturels, et le rendre non nocif pour la nature et l'Homme. Le détechnificateur fait appel à des activités semblables à celles du déstructurateur. (Figure 2.17).

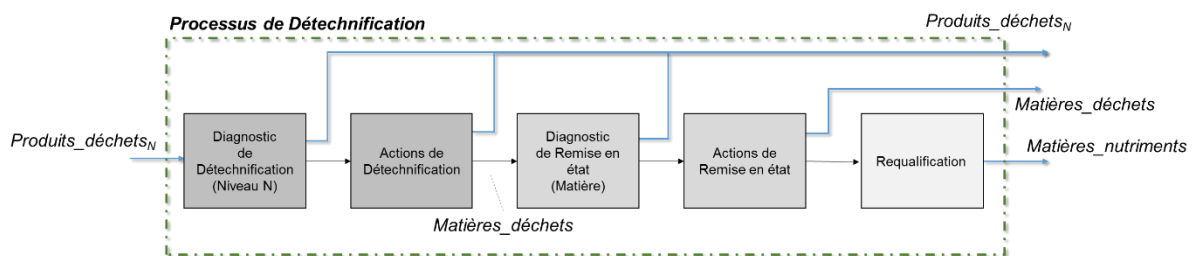


Figure 2.17 - Activités du processus de détechnification

Les matières non régénérées sont considérées comme des déchets et sont valorisées en tant qu'énergie ou stockées, impliquant leur fin de vie dans la sphère technique. La valorisation énergétique est un cas que nous souhaitons éviter afin de conserver le plus longtemps possible une matière dans le cycle industriel.

Nous avons vu que, durant les activités de diagnostic, un régénérateur pouvait estimer ne pas être en mesure de régénérer un produit_déchet. Dans cette situation, le produit_déchet est orienté vers un autre régénérateur (Figure 2.18) qui doit, à son tour, déterminer s'il est capable de le régénérer ou non. Pour maximiser le nombre de cycles d'utilisation, nous considérons que les produits_déchets doivent passer en priorité par la déconnexion, puis par le désassemblage, la déstructuration, la détechnification, et la valorisation énergétique ou stockage (dans le cas extrême).

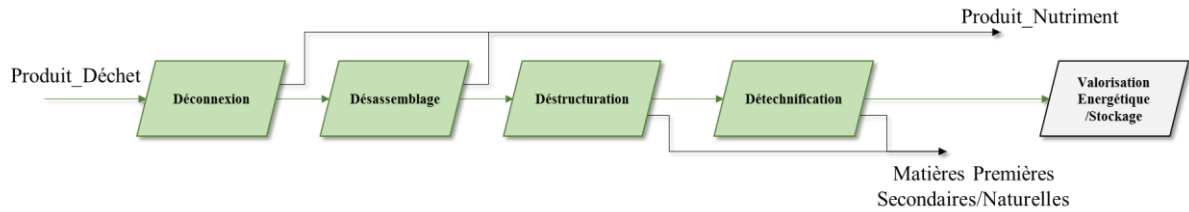


Figure 2.18 - Succession des processus de régénération en cas de non capacités à régénérer le déchet

Cependant, tous ces régénérateurs ne peuvent pas s'appliquer à tous les niveaux d'un produit (équipement, sous-ensembles, composants, matières) (Diez et al., 2016). Dans la section suivante, nous identifions les régénérateurs aux niveaux du produit.

2.3. Régénération globale

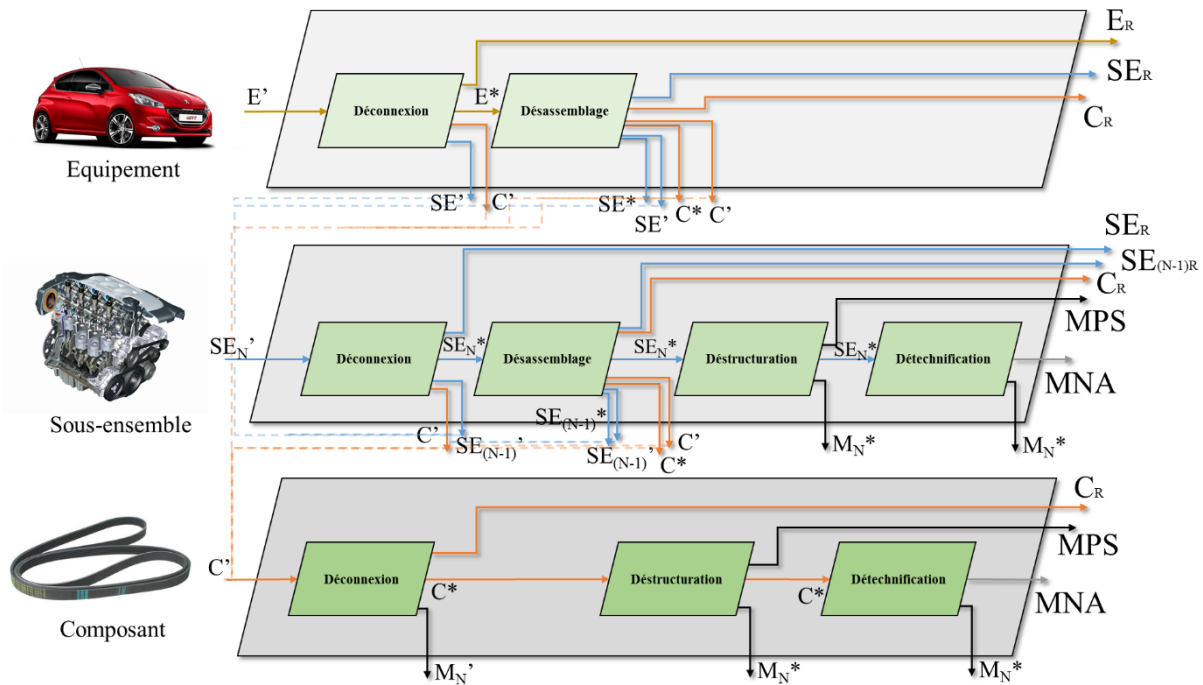


Figure 2.19 - Régénération multi-niveaux – Processus associés à chaque niveau du produit et échanges entre les différents niveaux (Diez et al., 2016),

Où E : Equipement, SE : Sous-ensemble, C : Composant, MPS : Matières Premières Secondaires, MNA : Matières Naturelles Absorbables, X' : X à régénérer, X_r : X régénéré et X^* : X non régénérable par le régénérateur

La régénération devant permettre de maximiser le nombre de cycles d'utilisation d'un produit, nous prenons comme hypothèse qu'un équipement à régénérer (E') ne peut être directement déstructuré ou détechnifié (Figure 2.19). En effet, un équipement étant constitué de sous-ensembles et composants, il faut faire en sorte d'en récupérer le plus possible afin de réduire la consommation d'énergie et de matières nécessaires à la fabrication de ses sous-ensembles/composants. La Figure 2.19 présente pour chaque type de produit_déchet, les régénérateurs possibles et les produits_nutriments qui en découlent.

Ainsi, un équipement est obligatoirement désassemblé s'il ne peut être remis en état par un processus de déconnexion. Lors des activités de diagnostic de la déconnexion, si l'équipement est estimé non réparable, il est envoyé vers le désassemblage (E^*). Lors des actions de remise en état de la déconnexion, des équipements régénérés (E_R), des sous-ensembles et composants à régénérer, respectivement (SE') et (C'), émergent. Le désassemblage de (E^*) produit des sous-ensembles et des composants régénérés (SE_R et C_R), des sous-ensembles et composants non régénérables par le régénérateur (SE^*) et (C^*), et des (SE') et (C'), suite à la remise en état des (SE_R) et (C_R).

Les sous-ensembles (SE') peuvent être remis en état pour être vendus en tant que pièces détachées (SE_r) via la déconnexion, ou désassemblés, ou déstructurés, ou détechnifiés. Le désassemblage des (SE'), permet également de produire des sous-ensembles et composants régénérés de niveau inférieur ($SE_{(N-1)R}$) et ($C_{(N-1)R}$). Suite à la remise en état des (SE_R) au sein de la déconnexion et du désassemblage, de nouveaux (SE')/(SE^*) et/ou composants à régénérer (C')/(C^*) apparaissent. La déstructuration et la détechnification produisent des matières premières secondaires (MPS) pour la sphère technique ou des matières naturelles absorbables (MNA) par la sphère naturelle, et des matières non régénérables par le régénérateur (M^*).

Les composants (C') peuvent être remis en état et vendu en tant que pièces détachées (C_R), ou déstructurés, ou détechnifiés.

Suite à cette présentation des différents régénérateurs, nous allons nous intéresser aux besoins des différentes parties prenantes impliquées dans la régénération afin de contribuer au développement industriel de ce paradigme. En effet, la régénération industrielle, de par ses objectifs et l'ajout de nouveaux processus métiers, vient modifier le comportement et les politiques mis en place chez les industriels. Ceux-ci doivent donc s'adapter pour prendre en compte la régénération et contribuer à une recherche d'équilibre au sein de la sphère technique et avec la sphère naturelle.

3. Comment mettre en place la régénération ? – Expression du Besoin

La mise en place de la régénération au sein de la sphère technique passe par la création d'un écosystème d'entreprises constitué de fournisseurs de produits_déchets, de régénérateurs et de clients de produits_nutriments (Figure 2.20).

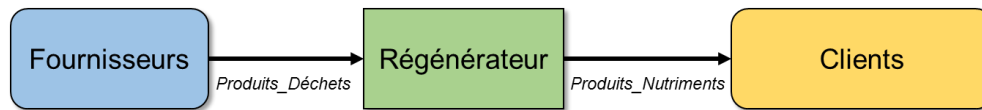


Figure 2.20 - Ecosystème d'entreprises pour la régénération

Cet écosystème peut fonctionner selon deux modes principaux, selon que l'on considère des flux poussés ou tirés de produits_déchets. Ces deux modes peuvent être mis en œuvre en même temps au sein de la sphère technique, et reposent sur 3 questions : **QUI**, **QUOI**, et **QUAND**.

3.1. Flux poussé

C'est cette approche qui est majoritairement présente dans la pratique aujourd'hui. Dans le cadre du flux poussé (Figure 2.21), les produits_déchets peuvent arriver à tout instant chez les régénérateurs (1), qui doivent ensuite chercher des clients (**QUI**), pour les produits_nutriments qu'ils auront régénérés (2). Ces clients formulent au préalable leurs besoins auprès des régénérateurs (3). Ces besoins (**QUOI**) représentent un état de santé attendu après la régénération du produit_déchet. Selon l'état diagnostiqué et les capacités de régénération du régénérateur, les exigences demandées par le client peuvent ne pas être satisfaites, obligeant le régénérateur à transférer le produit_déchet à un autre régénérateur. Si les exigences sont satisfaites par les produits_nutriments, ceux-ci sont fournis aux clients (4). Les régénérateurs ne maîtrisant pas les flux de déchets qui arrivent, et ne sachant pas s'ils pourront les régénérer, puis trouver des clients, ils doivent donc disposer de locaux pour stocker les produits_déchets, puis les produits_nutriments régénérés. Enfin aucune information n'est disponible sur la vie précédente du produit_déchet, ce qui impose aux régénérateurs de réaliser systématiquement des diagnostics avant toute régénération, et limite l'engagement contractuel du régénérateur sur la durée de vie résiduelle et les performances du produit_nutriment.

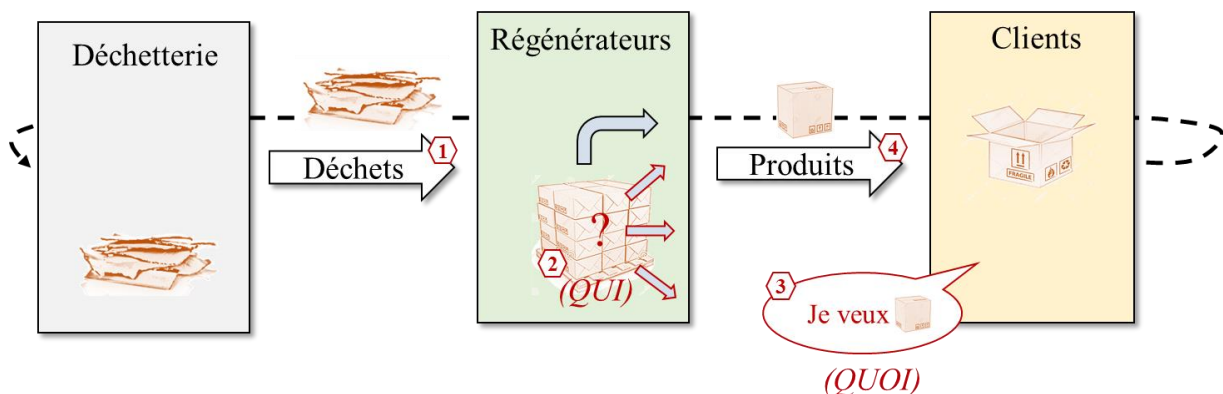


Figure 2.21 - Mise en place de la régénération industrielle - Cas du flux poussé

En ce qui concerne le **QUAND**, puisque les flux d'arrivée de produits_déchets ne sont pas maîtrisés par les régénérateurs, pour satisfaire la demande d'un client, il faut soit que les régénérateurs possèdent des stocks de produits_nutriments suffisants, soit qu'ils attendent l'arrivée de produits_déchets adaptés. Nous pouvons citer en exemple le groupe PAPREC qui reconditionne des disques durs (qu'il récupère auprès de déchetteries et d'industriels) pour les revendre à des brokers (Figure 2.22). Dans leur cas, le flux de disques durs (produits_déchets) n'est pas constant, et le groupe doit stocker les disques durs reconditionnés (produits_nutriments) en attendant d'avoir une quantité suffisante pour les revendre par lots.

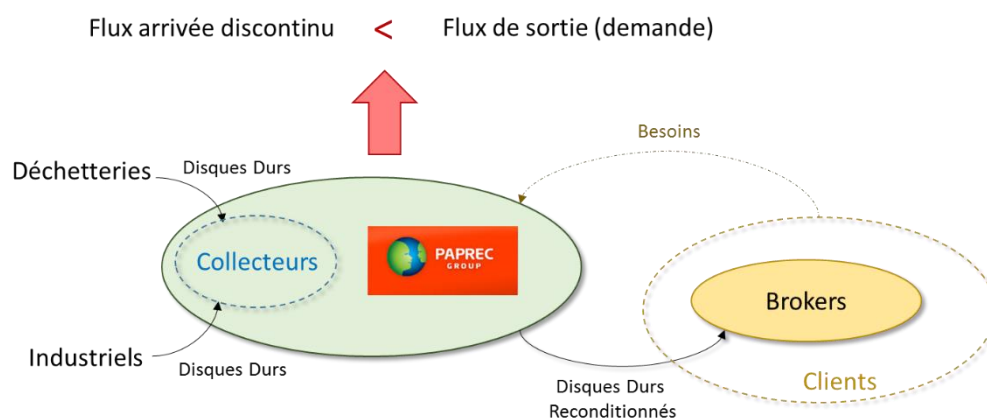


Figure 2.22 - Exemple de flux poussé non viable pour le groupe PAPREC

Toutefois, dans certains cas, par exemple, la société INDRA qui désassemble des véhicules automobiles, l'approvisionnement en produits_déchets n'est pas un problème. En effet, cette société transforme des produits_déchets (véhicules accidentés, véhicules hors d'usage) fournis par des collecteurs/récupérateurs (assurances et constructeurs automobiles) en produits_nutriments (véhicules accidentés et pièces détachées de rechange) à des garages et/ou des particuliers (Figure 2.23). L'afflux de véhicules étant largement supérieur à la demande, la société INDRA doit stocker les produits_nutriments non pas parce que la quantité est trop faible pour la revente, mais parce que la quantité est trop importante pour réussir à tout vendre.

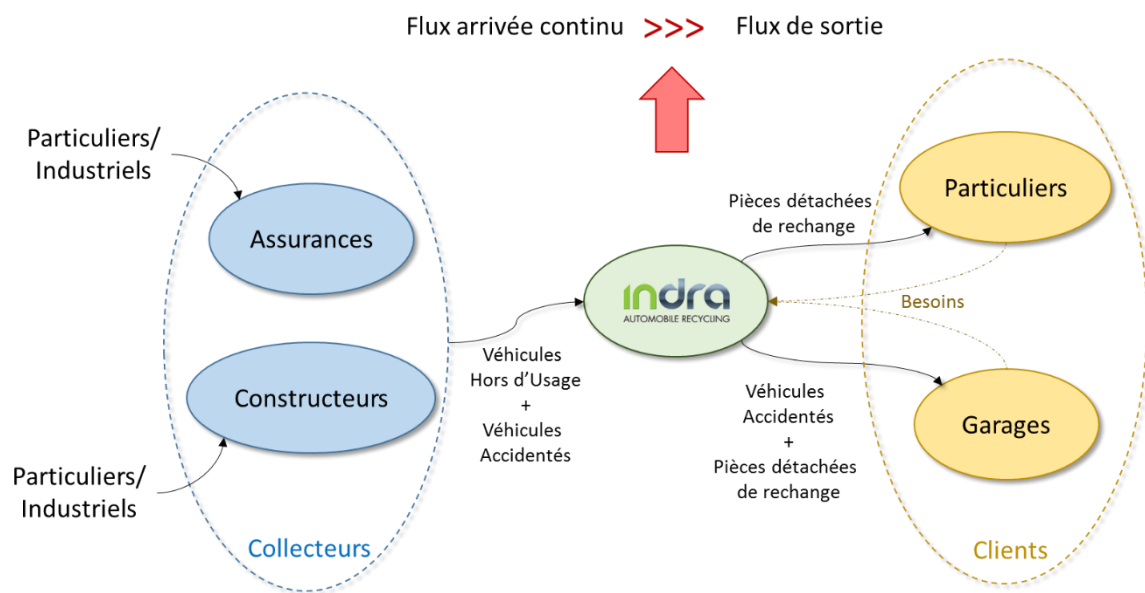


Figure 2.23 - Exemple de flux poussé viable - exemple pour la société INDRA

Au travers de ces deux exemples d'entreprises travaillant en flux poussé, on perçoit toute la difficulté du développement industriel de l'écosystème, de par :

- des difficultés pour les clients à être fournis en temps et en heure, en qualité et en quantité constantes,
- des difficultés à écouler des stocks de produits_nutriments.

Ces difficultés ont principalement pour origine la variabilité du flux de produits_déchets, ainsi que la non maîtrise de l'état de santé des produits_déchets entrants.

3.2. Flux Tiré

Pour pallier les problèmes précédents, on peut envisager de fonctionner à l'instar des industries de production, en flux tiré. Dans le flux tiré (Figure 2.24), la logique de revente est similaire à celle du flux poussé : les régénérateurs reçoivent des demandes des clients (sous la forme de type de produit + exigences : **QUOI**) (1), et vont, s'ils n'ont pas les produits_nutriments en stocks suffisants, chercher des fournisseurs, le **QUI**, proposant les produits_déchets requis (2). Cette recherche se fait soit par les régénérateurs eux-mêmes, soit par des entreprises spécialisées (collecteurs/coordonateurs) mettant en relation régénérateurs et fournisseurs selon les besoins des premiers. Toutefois, ici, les collecteurs peuvent démarcher des fournisseurs avant que ceux-ci ne décident de se séparer de leurs équipements. Un fournisseur peut décider de se séparer d'un équipement, pour des raisons d'obsolescence, de perte de fiabilité ou de performances (augmentation des consommations énergétiques, cadences de travail insuffisantes, qualité de fabrication en baisse, ...), et de rentabilité économique. Bien entendu, pour le fournisseur, le prix de

vente du produit_déchet est à déduire du coût de rachat d'un matériel équivalent neuf ou d'occasion, ayant des caractéristiques et des performances en augmentation. Les régénérateurs fixent leurs demandes en produits_déchets et les exigences associées, à chacun des fournisseurs trouvés (3), permettant à ces derniers de déterminer s'il est opportun pour eux de continuer à exploiter leur matériel, et/ou déterminer la meilleure date pour stopper son utilisation (4), le **QUAND**. Les produits_déchets repris par les régénérateurs (5) sont régénérés et vendus à leurs clients (6) (industriels/particuliers).

Dans une version évoluée du flux tiré, on peut imaginer que les régénérateurs n'aient plus besoin de faire les tests et diagnostics indispensables dans chaque processus de régénération, pour connaître sa décomposabilité et/ou l'état de santé du produit_déchet, car les fournisseurs fourniraient, en plus, du produit_déchet, les informations le concernant sur sa période d'utilisation (product lifecycle management). Ces informations portent sur la durée et les conditions d'utilisation de l'équipement, les opérations de maintenance corrective et préventive vécues, les niveaux d'usure, ... Ces informations peuvent être issues du processus de maintenance sous la forme d'un retour d'expériences et d'un état de santé. Dans cette approche de flux tiré, on pourrait également ne plus parler de produits_déchets en entrée des régénérateurs, mais directement de produits_nutriments.

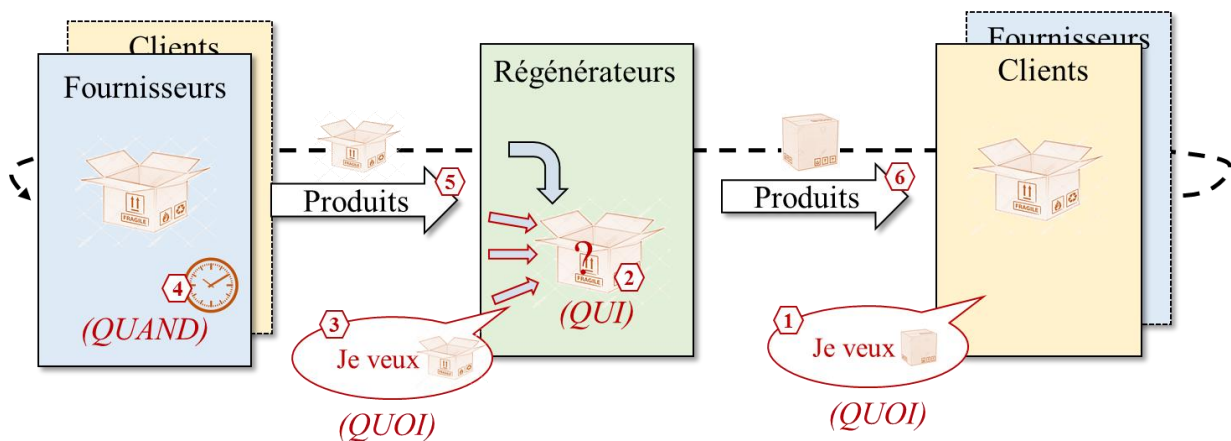


Figure 2.24 - Questionnement sur la mise en place de la régénération industrielle - Cas du flux tiré

Pour répondre aux questions (QUI, QUOI, QUAND) et créer un écosystème harmonieux entre les différents acteurs de la sphère technique et entre la sphère technique et la sphère naturelle, il est nécessaire de :

- Connaître le marché existant (Qui et Quoi),
- Connaître les attentes des régénérateurs et/ou des clients (Qui),

- Connaitre l'instant où l'état de santé d'un équipement est le meilleur pour le fournisseur et le régénérateur (Quand).

Notons ici que des plateformes informations commerciales « market place » pourraient fortement contribuer à favoriser ces échanges.

Dans nos travaux, nous supposerons qu'un marché potentiel existe pour chaque produit que nous considérons. C'est, par exemple, le cas dans le domaine des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (D3E), que nous développerons dans les chapitres suivants. Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéressons aux besoins des parties prenantes et aux paramètres à surveiller pour la régénération. Pour cela, nous proposons de compléter la notion d'exigences sur le produit afin qu'elle tienne compte de la régénération, et de nous intéresser au processus permettant d'obtenir les informations sur les produits_déchets.

III. Spécification du produit pour la régénération (Contribution 2)

L'objectif final de la régénération étant de pouvoir régénérer tout produit à tout instant, les différentes parties prenantes de l'écosystème (fournisseurs de produits_déchets, clients de produits_nutriments, régénérateurs), que nous avons définies, doivent mettre en œuvre les actions nécessaires et suffisantes pour qu'un équipement conserve un potentiel de régénération le plus haut possible tout en assurant le service requis. Ainsi, ces parties prenantes doivent être capables de connaître et de suivre les exigences du produit et de chercher à maintenir continuellement celles qui sont essentielles pour les régénérateurs. Toutefois, ces exigences ne sont pas ou peu présentes dans les référentiels existants, et doivent donc être ajoutées ou mises en avant. En d'autres termes, les exigences sur le produit (conception, fabrication) doivent être complétées pour prendre en compte la régénération.

La spécification est une notion se rapportant aussi bien au processus de spécification qu'au résultat de ce processus (Van Lamsweerde, 2000). Dans ce mémoire, nous nous intéressons au résultat du processus de spécification. Généralement utilisé lorsque la spécification est validée et approuvée par les deux parties, client et fournisseur.... La spécification est donc un document ou modèle prescriptif du système (elle prescrit ce que l'on attend de la solution du produit) (Fiorèse and Meinadier, 2012)).

Nous allons compléter les exigences produit en enrichissant les référentiels existants avec les exigences dites de « régénération ». Suite à cela, nous nous intéressons aux processus de régénération et aux conditions d'évolution du produit en leur sein.

1. Enrichissement du référentiel d'exigences produit

Selon (Fiorèse and Meinadier, 2012), une exigence « *prescrit une propriété dont l'obtention est jugée nécessaire. Son énoncé peut être une fonction, une aptitude, une caractéristique ou une limitation à laquelle doit satisfaire un système, un produit ou un processus* ». Chaque exigence doit être unique, précise, non ambiguë, vérifiable, faisable et réaliste, tout en restant cohérente et complète vis-à-vis des autres exigences. Afin de mettre l'accent sur l'élément concerné par les exigences que nous considérons, nous parlerons d'« exigences produit ». Ces exigences produit portent sur l'utilisation et sur la régénération du produit considéré.

1.1. Exigences d'utilisation

Les exigences d'utilisation d'un produit neuf regroupent toutes les exigences associées au produit et issues de l'analyse des phases de vie d'utilisation et de maintenance de celui-ci.

Les exigences produit définies en ingénierie sont issues des besoins de la maîtrise d'ouvrage (MOA) issues des analyses consommateurs (Figure 2.25). Les exigences obtenues suite à ces analyses sont raffinées par la conception afin de spécifier le produit. Nous appellerons ces exigences : « **exigences d'utilisation** ».

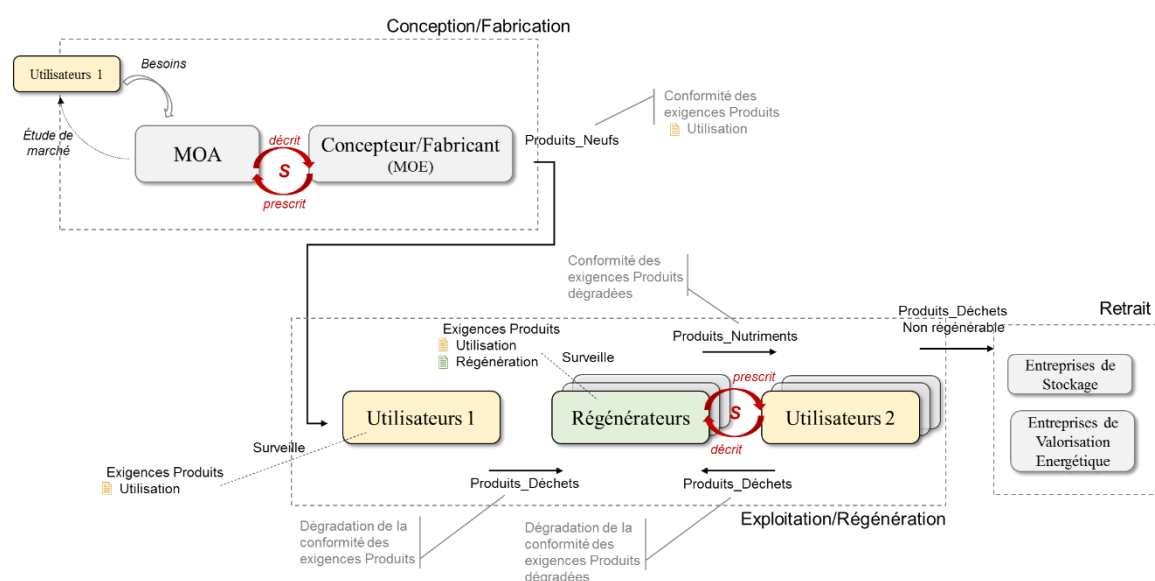


Figure 2.25 – Exigences produits considérées par les parties prenantes de la régénération

Les exigences d'utilisation peuvent porter, par exemple, sur :

- **Fonctionnalité** : le produit doit réaliser une mission ...,
- **Performance** : le produit doit ... en moins de ... secondes/minutes,
- **Sûreté de fonctionnement et Non-Dangerosité** : le produit doit être non-toxique ou ne pas mettre en insécurité le personnel devant l'utiliser,
- **Coût du produit** : le produit doit être en accord avec les prix du marché,

Les exigences d'utilisation du produit neuf seront également exploitées ultérieurement par les régénérateurs. En effet, tout produit_nutriment étant régénéré dans l'objectif d'être vendu, celui-ci doit satisfaire les exigences d'utilisation (Figure 2.25). Les produits_déchets doivent être caractérisés à leur arrivée chez les régénérateurs pour évaluer leur adéquation avec les exigences d'utilisation. En effet, au cours du temps la sollicitation et l'usure, dégradent l'état de santé de l'équipement qui ne répond, par conséquent, plus parfaitement aux exigences d'utilisation du produit neuf, malgré les opérations de maintenance corrective ou préventives, ce qui peut causer son rejet par le propriétaire. Ainsi, les régénérateurs dans la plupart des cas ont recours à une classification en grades ou en classes reflétant le niveau courant de conformité du produit par rapport à sa spécification cf. § II. 2.2.2.1. Le diagnostic de remise en état présents dans chaque régénérateur permet de caractériser les produits_déchets en entrée, tandis que la requalification caractérise les produits_nutriments en sortie de régénération.

Ainsi dans l'exemple ci-dessous, un produit_nutriment sera de classe A s'il est conforme à ses spécifications initiales avec un écart exprimé ou raffiné selon les deux dimensions « aspect physique » et « état technique » en accord avec la Figure 2.13. Le Tableau 2.1 présente une caractérisation d'un produit_nutriment de classe A par rapport à un produit neuf.

Tableau 2.1 - Exemples de caractérisation d'un produit_nutriment non neuf selon ses exigences d'utilisation

Exigence initiale produit neuf	Exigence produit_nutriment classe A
	L'aspect physique du produit_nutriment doit être au minimum de classe B.
Le taux de rayures doit être nul	Le taux de rayures doit être inférieur à 2%.
	L'état technique du produit_nutriment doit être de classe A.
La consommation énergétique doit être de 2,5kwh en fonctionnement	La consommation énergétique doit être inférieure à 3kWh.

Toutefois, avant de réaliser le diagnostic de remise en état, les régénérateurs doivent déterminer s'ils sont en mesure de régénérer ou non le produit_déchet, c'est à dire s'il satisfait des exigences de régénération.

1.2. Impact de la Partie Prenante « Régénération » sur les exigences du produit

A l'heure actuelle, lors de la phase de conception, peu d'exigences sur les régénérations futures sont prises en compte. Cependant ces exigences sont requises par les régénérateurs afin qu'ils puissent réaliser le diagnostic de décomposition sur les produits_déchets, établissant la capacité du régénérateur à régénérer des produits_déchets. Ainsi, il est nécessaire que les régénérateurs soient considérés comme parties prenantes dans la spécification du produit. Les exigences des régénérateurs doivent être raffinées par la conception qui doit ensuite les ajouter aux référentiels d'exigences produit existants (Figure 2.26). Cet ajout permet de garantir un suivi de ces exigences tout au long des phases de vie du produit. Nous appellerons les exigences portant sur le potentiel de régénération du produit, les « **exigences de régénération** ».

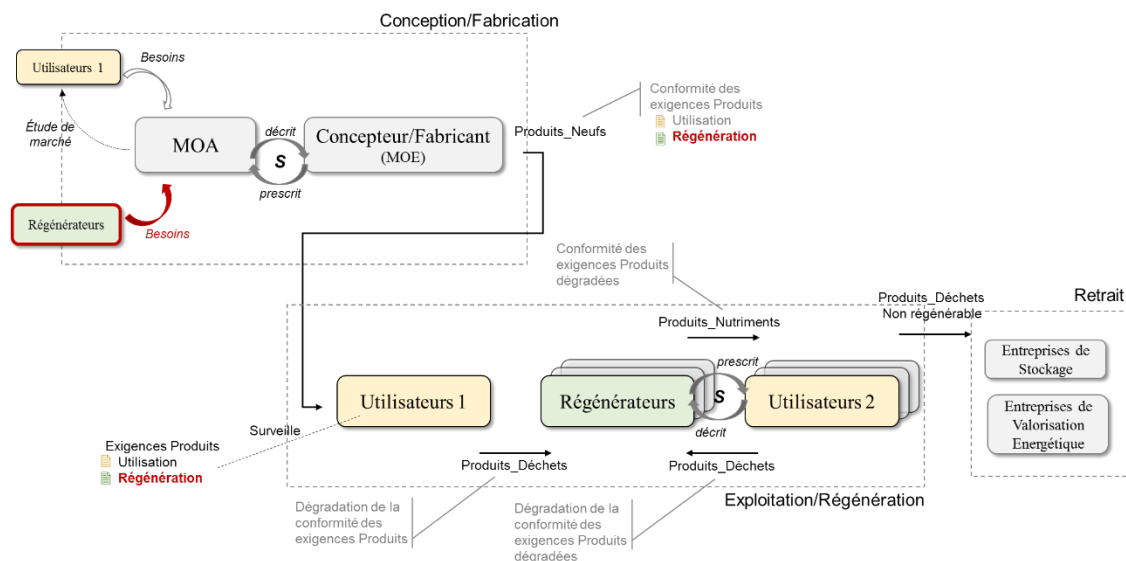


Figure 2.26 – Exigences produits considérées par les parties prenantes de la régénération avec prises en compte des régénérateurs comme parties prenantes du produit

Les exigences de régénération peuvent porter sur, par exemple :

- **Désassemblabilité** : le produit doit être désassemblable, c'est à dire qu'il est possible d'accéder de façon réversible à ses constituants.
- **Séparabilité** : les matières constituant le produit doivent pouvoir être séparées après actions de tri/broyage.
- **Biodégradabilité** : les matières doivent être décomposables par les décomposeurs naturels.

Notons que les exigences de régénération peuvent être assez proches d'exigences de maintenabilité du produit, dans leur formulation ou leur intention (désassemblage pour faciliter la maintenance ou la régénération). De plus, le raffinement des exigences de régénération peut induire des exigences portant sur les opérations de maintenance à réaliser en utilisation. A titre d'exemple, dans le cas du désassemblage (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 - Exemples d'exigences de régénération

Référence exigence		Exigence
Exig.Regen.1		Le produit_déchet doit être désassemblable à tout moment.
	Exig.Maintenance.1	Les vis doivent être remplacées toutes les 5 réparations.
	Exig.Maintenance.2	Les axes doivent être graissés tous les 3 mois.

Finalement, la spécification d'un **produit contient des exigences d'utilisation et des exigences de régénération**.

A l'image de cette distinction d'exigences, et pour mettre en avant les catégories d'exigences exploitées par les différences fonctions des régénérateurs (décomposition, remise en état et requalification), nous proposons de considérer que l'état de santé du produit soit composé de son **état de santé d'utilisation** et de son **état de santé de régénération**. Le premier porte sur le niveau de satisfaction des exigences d'utilisation et le second sur celui des exigences de régénération.

Afin d'aider les parties prenantes à organiser leur référentiel d'exigences, nous proposons de les classer et de les identifier selon leur typologie.

1.3. Typologie des exigences produit

Dans (Diez et al., 2017), nous proposons de classer l'ensemble des exigences produit à satisfaire en vue de la régénération d'un produit_déchet, selon leur type (utilisation ou régénération) et le pilier du développement durable qu'elles satisfont, c.-à-d. : **environnement**, **social** et **économie**. A ces piliers, nous ajoutons une quatrième catégorie : **technique**, correspondant à l'état de santé du produit. Cette catégorie se compose de deux sous-catégories : **aspect physique** et **état technique**, elles-mêmes pouvant se répartir selon les catégories (Pyster et al., 2011) :

- **Exigences de fonctionnalités** : portent sur les fonctions que doit remplir le système (ce que le système doit faire).
- **Exigences de performances** : définissent dans quelle mesure et dans quelles conditions une fonction ou une tâche doit être exécutée
- **Exigences d'interfaces** : portent sur les interfaces externes et internes du système (comment le système doit être connecté, interagir... avec son environnement et ses sous-ensembles)
- **Exigences de contraintes** : portent sur les aptitudes, la qualité de service attendue sur l'ensemble des missions du système, sur les critères de réalisation, le choix de la technologie à utiliser...

Les exigences d'utilisation couvrent l'ensemble des piliers du développement durable. En effet, par exemple, un client peut avoir des exigences portant sur l'état de santé du produit (technique), son coût de revient (économique), son niveau de sécurité (social) et sa toxicité (environnemental). Pour les exigences « techniques », celles-ci dépendent de :

- l'aspect physique portant sur des contraintes (rayures, bosses, couleurs, brillance, rugosité...) et sur des exigences d'interfaces (présence ou non des connectiques sur le produit_déchet),
- l'état technique portant sur des exigences de fonctionnalité, notamment sur les interfaces (fonctionnelles ou non), et de performances (consommation énergétique).

Les exigences de régénération se focalisent sur des exigences techniques pour déterminer le potentiel de régénération du produit_déchet. Celles-ci se réfèrent à des exigences de type contraintes (sur les activités de décomposition) et interfaces (possibilité de recâbler les connectiques manquantes).

Outre les exigences produit, il existe des exigences sur le processus de régénération lui-même, conditionnant la bonne succession des activités de régénération.

2. Exigences processus – exigences internes aux processus de régénération

Nous appelons ces exigences, les « **exigences processus** ». Celles-ci viennent s'ajouter aux exigences que les régénérateurs doivent considérer lors de la régénération d'un produit_déchet (Figure 2.27).

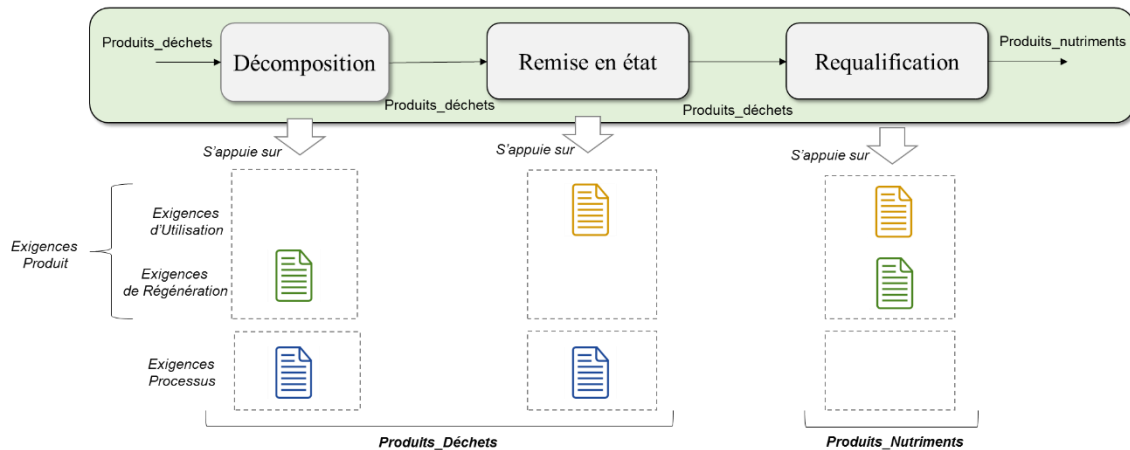


Figure 2.27 – Catégories d'exigences considérées par les fonctions des régénérateurs

Les exigences processus peuvent porter, par exemple, sur :

- les entrées et les sorties des activités des régénérateurs (ex : % de produits_déchets non régénérables en sortie d'activité...),
- les procédures mises en place pour la bonne réalisation des diagnostics, et des actions de décomposition, remise en état et de requalification (ex : commencer par inspecter l'aspect physique du produit_déchet, et plus particulièrement ses interfaces, outils adaptés...),
- les normes à respecter, fixées par les instances étatiques et appliquées par les régénérateurs (normes qualité, hygiènes et sécurité...),
- le temps mis pour réaliser chacune des activités (ex : temps de décomposition et de régénération maximal à ne pas dépasser),
- marge souhaitée par les régénérateurs sur les produits_nutriments (ex : prix des pièces de rechanges, amortissement des équipements de diagnostic...)
- ...

La régénération d'un équipement au sein des régénérateurs est soumise à de nombreuses exigences pouvant parfois supprimer toute possibilité de régénération du produit par tout ou partie des régénérateurs, lorsque celles-ci ne sont pas respectées. Il est donc très important de pouvoir les surveiller et de les maintenir au travers du temps, des utilisations et des régénérations.

Afin de faciliter la mise en place de la régénération dans un cadre industriel, celle-ci doit être prise en compte sur l'ensemble des phases de vie des produits, et cela dès la phase de conception. Nous ne traiterons pas spécifiquement ce point dans ce mémoire, car il a en

partie été largement abordé dans la littérature et fait l'objet de travaux scientifiques dans le domaine de la conception de produit. Pour notre part, et en relation directe avec la spécificité de notre équipe de recherche, nous préférons nous focaliser sur la vie opérationnelle de l'équipement, et plus spécifiquement sur son maintien en conditions opérationnelles et sa maintenance. En effet, pour assurer qu'un produit_déchet conserve un potentiel suffisant de régénération, il faut être en mesure de surveiller et de maintenir au travers du temps la satisfaction des exigences de régénération. Ainsi, cela induit une forte interaction avec la maintenance, que nous détaillons dans le paragraphe suivant, qui constitue notre 3^{ème} contribution.

IV. La maintenance, clé de voute de la régénération (Contribution 3)

Le processus de maintenance est défini comme étant « *l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise* » (ISO 13306, 2010). Cette définition contient en filigrane les éléments permettant de prendre en considération le paradigme de régénération et d'aider à le mettre en place industriellement, notamment par son rôle de tour de contrôle.

Depuis plusieurs années, le processus de maintenance évolue et se préoccupe de plus en plus du développement durable. Dans (Iung and Levrat, 2014), les auteurs dressent un état des lieux des orientations principales en développement durable, et mettent l'accent sur la façon dont la maintenance peut contribuer à ces orientations. Dans (Takata, 2013), l'auteur introduit le concept de maintenance-centered circular manufacturing pour que la maintenance contribue à la circularité de la production. On trouve dans la littérature des travaux sur la « green maintenance » (Ajukumar and Gandhi, 2013). Cette approche se focalise sur l'élimination des déchets produits par et associés à la maintenance. Pour cela, elle impose, principalement, de faire de la prévention en termes de pollution (ex : production de CO₂, rejets de molécules dangereuses pour l'Homme...) et de réduire l'utilisation de produits toxiques (ex : utilisation de dégraissant moins corrosif, ...).

D'autres travaux visent à mettre la proactivité de la maintenance au service de l'efficacité énergétique des systèmes industriels. Ainsi, (Hoang et al., 2017) proposent un pronostic de la performance d'Efficacité Énergétique en maintenance et introduit le concept de Remaining Energy Efficiency Life (REEL) par analogie avec la Remaining Useful Life (RUL) (durée de vie résiduelle). Dans (Nzukam et al., 2017) dans le cadre du projet Européen Energy in Time, une approche Prognostics and Health Management est

appliquée dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments non résidentiels, sur des installations de traitement de l'air, de climatisation et chauffage (HVAC). Des recherches exploitent également la vision proactive de la maintenance pour favoriser une partie de la régénération des équipements. Par exemple, (Song et al., 2015) proposent de faire de la maintenance proactive sur certains composants critiques pour déterminer quand arrêter d'exploiter un système afin de garantir la possibilité de refabrication du système. Tandis que (Hu et al., 2015) proposent une démarche pour sélectionner (après utilisation) le meilleur repreneur d'un système en fonction de sa RUL (Remaining Useful Life). A titre d'exemple, nous pouvons citer le cas de l'hélicoptère à qui on demande un niveau de fiabilité très élevé lorsqu'il est utilisé par les militaires ou dans des missions de sauvetage ou de secours. Lorsque ce niveau devient insuffisant, l'hélicoptère peut être vendu à des transporteurs de matériaux ou encore à des particuliers. L'hélicoptère étant moins sollicité et pour des missions moins contraignantes, le niveau de fiabilité n'a pas besoin d'être aussi élevé. Ce niveau va donc conditionner le type d'acheteur potentiel.

En complément, le processus de maintenance peut donc contribuer au développement industriel du paradigme de régénération. Ainsi, en plus de sa fonction classique, la maintenance pourrait se voir attribuer un nouvel objectif, celui de **maintenir à travers le temps le potentiel de régénération d'un équipement**.

1. Maintenance, apport à la régénération

Le processus de maintenance est le candidat parfait pour manager, surveiller et anticiper la régénération.

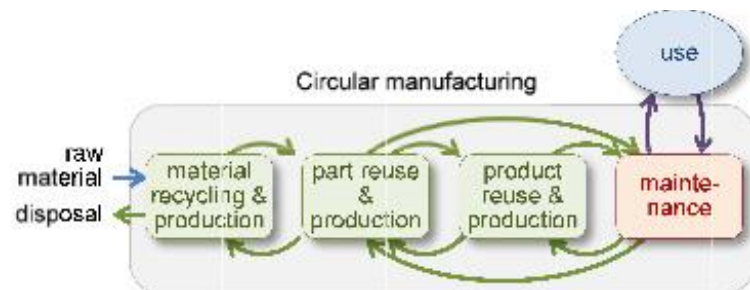


Figure 2.28 - "Concept of maintenance-centered circular manufacturing" - extraite de (Takata, 2013)

On voit dans la Figure 2.28 issue de (Takata, 2013) que l'auteur, sans le développer, envisage la maintenance comme élément principal dans son concept de Circular Manufacturing. C'est dans cette direction que nous orientons notre proposition, en considérant la maintenance comme la tour de contrôle de la régénération.

En effet, le processus de maintenance est le témoin de la vie en utilisation de tout équipement réparable. Il est capable, par la mémoire de ses actions de maintenance

corrective, de retracer les scénarios de défaillances vécues par l'équipement, et par ses actions préventives, d'avoir une image de l'état de santé de l'équipement à un instant donné (liste des constituants de l'équipement avec les dates de remplacement).

De plus, si elle est mise en œuvre la maintenance conditionnelle permet d'avoir une image à chaque instant de mesure, du niveau d'usure ou de dégradation de tout ou partie de l'équipement. Enfin la maintenance prévisionnelle au travers de l'analyse et de l'évolution des paramètres significatifs de la dégradation, permet de projeter cet état de santé dans le futur et de déterminer une RUL.

La nouvelle approche de la maintenance « Prognostics and Health Management » (PHM) vise à étendre le rôle de la maintenance de la simple réparation après défaillance au management de la santé des équipements (meilleure gestion de l'utilisation des équipements dans le cadre de leurs missions). Nous proposons que cette vision de management de l'état de santé soit étendue à la régénération, et donc, à l'optimisation du cycle de vie des produits dans une vision PHRM : Prognostics for Health and Regeneration Management (Figure 2.29).

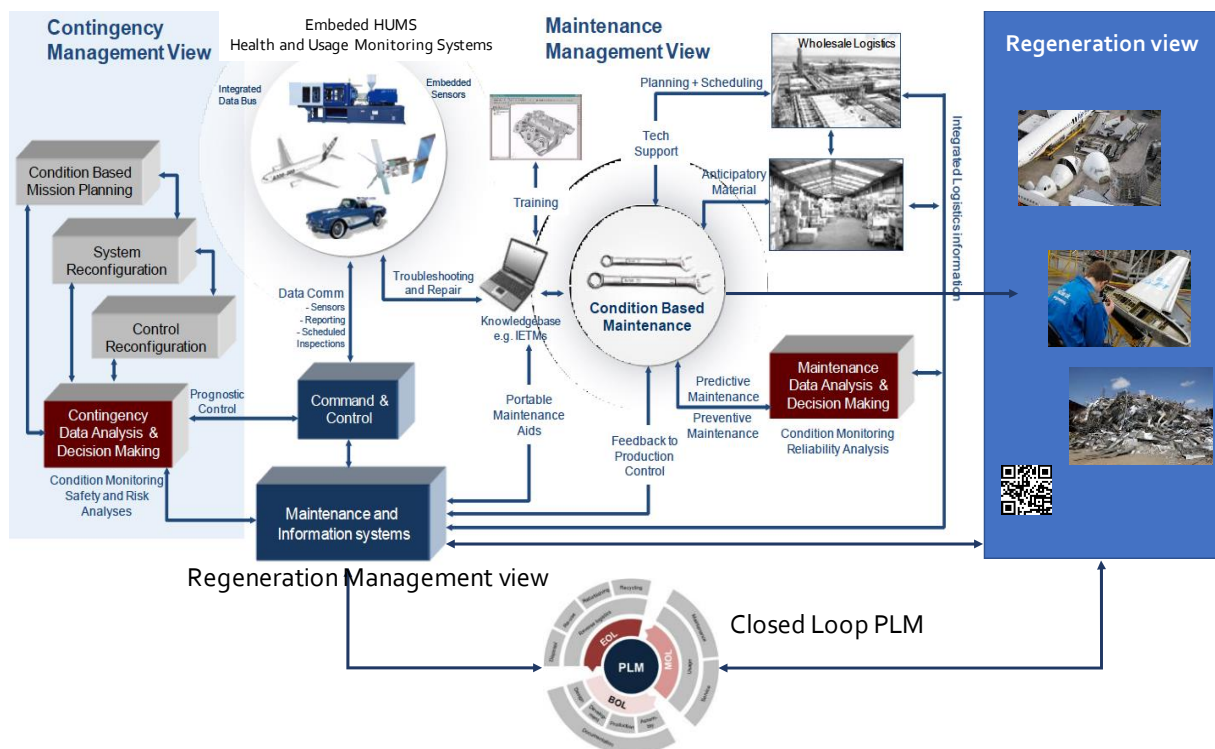


Figure 2.29 - Extension du PHM au Prognostics for Health and Regeneration Management (depuis une figure issue de (Saxena, 2010))

Le PHM s'appuie sur un processus pronostic dont le but est « d'estimer l'évolution des dégradations futures des différents composants du système et l'évolution de ses performances » (Voisin et al., 2010). En adaptant ce processus à la régénération, il s'agit

de prévoir l'évolution de l'état de santé, pour déterminer la durée de vie résiduelle **avant perte du potentiel de régénération**, et permettre à l'exploitant/utilisateur de ne jamais dépasser des limites irréversibles de régénération.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la régénération, nous avons vu que deux visions sont possibles. L'une porte sur un flux poussé de produits_déchets pour lesquels l'état de santé n'est pas maîtrisé à l'arrivée. L'autre sur un flux tiré de produits_déchets, dont l'état de santé minimal attendu est spécifié entre le régénérateur et l'utilisateur/fournisseur.

C'est dans cette seconde vision que le rôle de la maintenance serait particulièrement important. En effet comme nous l'avons vu, l'utilisateur d'un équipement serait en mesure de surveiller l'état d'un équipement, et de prévoir quand cet équipement ou ses sous-ensembles ne seront plus régénérables, c'est à dire qu'il ne respectera plus ses exigences d'utilisation et de régénération. L'objectif visé est de maximiser l'utilisation qui est faite d'un équipement sans porter atteinte à son potentiel de régénération. Ainsi, tous produits_déchets deviendraient des produits_nutriments (Figure 2.30).

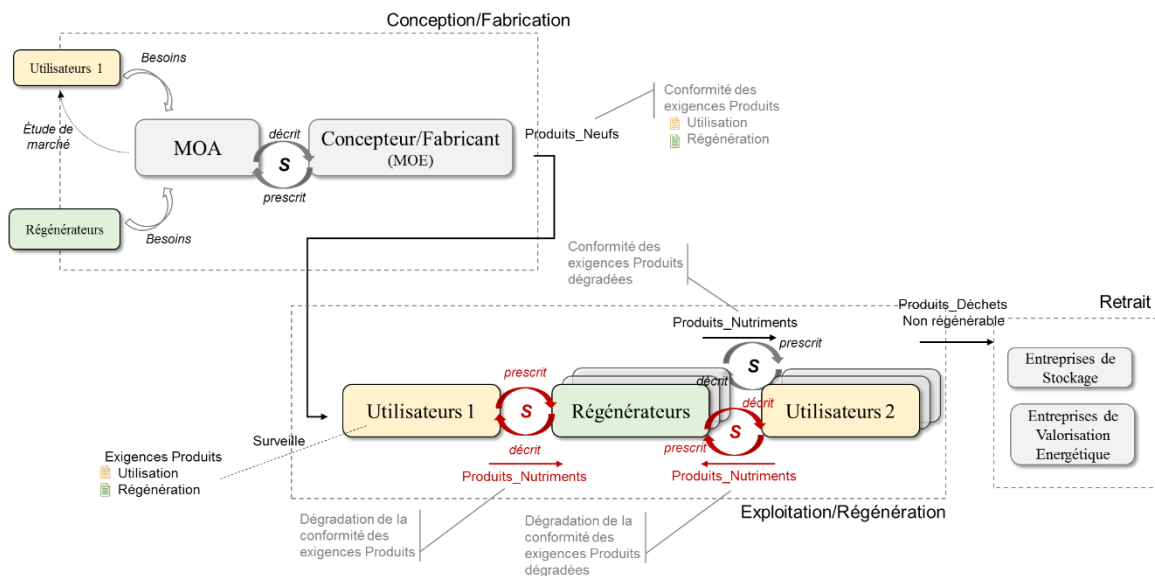


Figure 2.30 – Impact de la mise en place d'une maintenance de régénération chez les utilisateurs sur les produits_déchets

Au processus de pronostic s'ajoute un processus d'aide à la décision qui permet d'évaluer différents scénarii de maintenance et de choisir le plus intéressant en fonction du contexte et des différents objectifs visés (Cocheteux, 2010; Thomas, 2009). En termes de régénération, cela revient à sélectionner le meilleur régénérateur pour un équipement, ou un sous-ensemble donné (dont on veut se séparer) en fonction de son état de santé, ou

mettre en œuvre les actions de maintenance préventive pour assurer la reprise de l'équipement par un futur régénérateur (et bien sur un prix de rachat donné).

Quelle que soit la vision retenue pour la régénération, (flux poussé ou tiré) le besoin d'informations est fondamental, informations sur la vie en utilisation de l'équipement (usage, sollicitations, conditions opérationnelles, conditions environnementales) ainsi que sur la maintenance réalisée (défaillances, dégradations, remplacements préventifs, ...).

Le concept de HUMS (Health and Usage Monitoring System) est particulièrement adapté et embarqué sur les produits (lorsque cela est possible) il peut alimenter (après traitement et synthèse) un outil de PLM (Product Life Management). Le PLM permet de manager toutes les données liées à un produit, depuis la conception, la production, l'exploitation, le soutien logistique et idéalement jusqu'au retrait. Le Closed Loop PLM doit quant à lui tracer les différents cycles d'utilisation d'un produit, son évolution par rapport aux exigences imposées. Si une partie des données étaient distribuées et embarquées sur le produit, lors de sa vente, l'acheteur connaîtrait exactement l'état de santé de l'équipement et ses vies antérieures. Cela faciliterait grandement les échanges réalisés au sein de l'écosystème d'entreprises et les actions opérées dans les régénérateurs, jusqu'à alléger l'étape de qualification.

La maintenance a beaucoup d'atouts qu'il faut utiliser pour mettre en place la régénération au sein de la sphère technique. Elle possède déjà la majeure partie des compétences requises pour cela. Néanmoins, des recherches sont encore à mener pour qu'elle s'adapte et adapte ses méthodes et outils.

2. Régénération : impact sur la maintenance

Avec la régénération apparaissent de **nouvelles défaillances** que la maintenance doit donc anticiper. Ces défaillances correspondent au fait qu'un équipement ou un sous-ensemble ne soit plus en capacité d'être régénéré par le régénérateur choisi ou au moins par un régénérateur, c'est-à-dire, qu'il ne répond plus aux exigences fixées par les régénérateurs. Nous les appelons les « **défaillances de régénération** » ou par contraction « **dé-génération** ». Ces défaillances peuvent être difficiles à gérer car elles peuvent facilement être impactées par les défaillances dites « classiques » (défaillances habituellement traitées et connues de la maintenance). En effet, si une défaillance apparaît sur un équipement, les opérateurs de maintenance doivent bien sûr remettre

l'équipement en fonctionnement, mais ils doivent également veiller à ce que leurs actions n'affectent pas négativement le potentiel de régénération de l'équipement.

Pour éviter les dé-génération, la maintenance doit **surveiller de nouveaux éléments et de nouvelles performances**, et/ou **surveiller autrement**. A titre d'exemple, pour régénérer un produit avec un désassembleur, la maintenance doit veiller à ce que les sous-ensembles soient toujours accessibles, c'est-à-dire, surveiller l'état des interfaces. Autre exemple, sur le marché, un client accepte de reprendre un équipement seulement si celui-ci produit un minimum de 40 pièces/heures. Le régénérateur déconnecteur impose donc à ses fournisseurs de ne lui fournir que des équipements ayant cette performance, ou que celle-ci soit récupérable en réalisant quelques réparations. Cela impose à la maintenance des fournisseurs de surveiller le niveau de production de l'équipement qu'il souhaite vendre et de le maintenir de façon à ce que celle-ci soit récupérable en cas de panne. D'autres performances peuvent être considérées telles que la compatibilité avec d'autres systèmes (interfaces standards), la consommation énergétique, l'efficacité énergétique (Godichaud et al., 2012), etc.

Dans le paradigme de régénération, la maintenance peut également enrichir sa palette d'activités, en plus de surveiller l'état de santé des équipements pour répondre aux exigences des régénérateurs, elle peut également rechercher et sélectionner les régénérateurs selon l'état de santé courant et futur des équipements. En effet, en connaissant l'historique d'un équipement (origine, architecture, taux de défaillance, actions de maintien, éléments remplacés, nombre de défaillances, usage...) et son état de santé courant, la maintenance peut orienter cet équipement vers le régénérateur qui pourra lui offrir le maximum de cycles d'utilisation, ou la meilleure rentabilité financière. Cette capacité de décision nécessite néanmoins de connaître les exigences des différents régénérateurs potentiels et de connaître l'état du marché de l'occasion pour le type d'équipements, tout en les combinant avec les exigences d'utilisation de l'utilisateur courant. C'est à la maintenance que pourrait revenir la tâche de trouver le bon moment pour arrêter l'exploitation d'un équipement, sans attendre sa fin de vie. A l'image des travaux de (Hu et al., 2015; Iung and Levrat, 2014; Song et al., 2015) qui proposent d'utiliser le pronostic pour étudier les propriétés des équipements et garantir le respect des exigences de durabilité, **anticiper** les défaillances de régénération évite à l'équipement d'aller directement en déstructuration. Cette anticipation peut se faire en fonction d'un régénérateur imposé par l'utilisateur ou la maintenance, ou de l'ensemble des régénérateurs susceptibles de reprendre l'équipement.

Finalement la maintenance se retrouve à considérer deux types de défaillances, à surveiller qu'elles ne s'affectent pas les unes et les autres, à mettre en place de nouveaux plans de maintenance pour la régénération (Regeneration Centered Maintenance), de nouveaux protocoles de surveillance, à prédire d'autres situations, ... La maintenance est un processus majeur dans la régénération.

V. Conclusion

Le paradigme de régénération est un concept novateur qui doit être mis en œuvre pour répondre aux problématiques liées à l'environnement et au bien être humain. Toutefois, bien que l'économie circulaire fasse référence à ce paradigme, peu d'illustrations sont disponibles. C'est pourquoi, en début de chapitre, nous avons posé les bases de ce paradigme en nous inspirant de la nature. Puis, dans un second temps, nous l'avons transposé au milieu industriel, en identifiant et en l'enrichissant par les éléments manquants : la notion de nutriments (tout produit sert de nourriture à un processus) et de régénérateurs (processus permettant de régénérer un produit qu'un utilisateur ne veut plus, quelle qu'en soit la raison). Suite à ces enrichissements, nous avons mis en avant que la mise en place d'un écosystème d'entreprises pour la régénération était nécessaire ; et que pour cela, de nouvelles exigences (de régénération pour les exigences produit, et processus pour les régénérateurs) devaient être ajoutées aux référentiels déjà utilisés par les acteurs de cet écosystème. Nous avons également mis en évidence que le processus de maintenance, de par ses activités, était un des processus clés de la régénération. En effet, celui-ci est vu comme une « tour de contrôle », un « coordinateur », « un aiguilleur » de la régénération.

Le chapitre suivant porte sur la mise en place d'un outil d'évaluation et d'aide à la décision pour justifier la régénération industrielle. Pour cela, nous proposons des patterns modélisant le comportement du produit et des processus de régénération ainsi que leurs exigences.

Chapitre 3 : Aide à la décision pour la régénération industrielle

I. Introduction

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la régénération industrielle peut être une solution à la raréfaction des ressources naturelles et à l'accumulation des déchets tout en continuant à approvisionner la société en produits finis. Le paradigme de régénération mêle environnement, économie et social, ce qui le rend complexe à appréhender et à mettre en place.

Toutefois pour appliquer la régénération à la sphère technique et inciter les industriels à la mettre en place, il faut démontrer qu'elle est une solution à moyen et long terme permettant de réaliser des bénéfices tout en préservant la planète et ses habitants. C'est pourquoi, nous proposons, dans ce chapitre, de développer un modèle permettant, grâce à des simulations, d'appréhender plus précisément la régénération et les changements qu'elle implique, tant sur le plan environnemental, qu'économique. Le plan social n'est pas abordé dans cette thèse.

La régénération industrielle nécessite d'établir de nombreuses relations entre différents acteurs industriels, de mettre en place des boucles de rétroaction, et s'appuie sur de nombreuses décisions, pour être implantée et maintenue au mieux dans la sphère technique. Pour cela, nous proposons, dans ce chapitre, de développer un outil « d'aide à la décision ». La nécessité de cet outil est argumentée en quelques points dans une première partie. Dans la deuxième partie, une analyse de quelques outils de modélisation est proposée afin d'en sélectionner un, en fonction de nos besoins de modélisations et de simulations. La démarche de modélisation à l'aide du modèle retenu est ensuite détaillée dans la troisième partie. Finalement, nous proposons un ensemble de patterns permettant de modéliser le comportement du produit dans les différents cycles d'utilisation, et les interactions au sein de la régénération.

II. Aide à la décision

La mise en place de la régénération industrielle nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres qu'il n'est pas toujours aisé de concilier. De plus, des décisions doivent être prises tout au long de la régénération d'un produit_déchet, pour satisfaire les exigences clients ou celles des régénérateurs.

1. Point de vue des fournisseurs de produits_déchets

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, dans une approche de flux tiré, les fournisseurs doivent respecter les exigences imposées par les régénérateurs, et en même

temps satisfaire leurs propres besoins d'utilisation. Ils doivent donc trouver le juste équilibre entre rentabilité directe et régénérabilité.

Avant de fournir un produit_déchet à un régénérateur, le fournisseur doit s'assurer que l'achat du produit_nutriment a été rentabilisé. Pour cela, le fournisseur doit déterminer la durée minimum d'exploitation de l'équipement avant mise en vente pour régénération. L'estimation de cette durée dépend de la durée qu'il faut au fournisseur pour amortir l'achat du produit_nutriment (retour sur investissements), et de son prix de vente.

Toutefois, avant d'atteindre la durée minimum avant régénération, l'équipement peut ne plus satisfaire les exigences imposées par le régénérateur. Pour remédier à cela, le fournisseur doit déterminer la limite basse des exigences des régénérateurs qu'il ne doit pas dépasser, au risque de ne pouvoir faire regagner son potentiel de régénération à l'équipement dont il souhaite se défaire. Le fournisseur doit également déterminer les actions de maintenance qu'il va devoir réaliser pour maintenir, ou redonner, le potentiel de régénération de l'équipement/sous-ensemble. Autre point à déterminer, celui de l'instant où réaliser les actions de maintenance. En effet, est-il plus intéressant de les faire juste avant la mise en vente, ou de la faire tout au long de l'exploitation de l'équipement ?

2. Point de vue des régénérateurs

L'aide à la décision pour la régénération s'adresse en priorité aux régénérateurs puisque ce sont eux qui font le lien entre les fournisseurs et les clients, et qui ont le plus de décisions à prendre pour régénérer un produit_déchet (régénération ou non, actions à faire, choix du client et du fournisseur). Nous listons quelques questions qu'un régénérateur peut se poser pour mettre en place sa politique de régénération.

Régénérer ou non ?

Dans un premier temps, les régénérateurs doivent déterminer s'il est intéressant ou non de régénérer un produit_déchet d'un point de vue économique, mais également selon leurs propres exigences de régénérations et selon les besoins des clients.

En tout premier lieu, le régénérateur doit déterminer, à l'instant où le produit_déchet arrive chez lui, s'il peut le régénérer, en s'appuyant sur les différentes exigences que le produit_déchet doit satisfaire. Dans le même temps, le régénérateur doit déterminer les seuils que le produit_déchet ne doit pas dépasser pour pouvoir être régénéré. Cette limite dépend de la capacité de la remise en état à régénérer le produit_déchet.

Avant de régénérer un produit_déchet, le régénérateur doit déterminer si la régénération ne va pas engendrer des pertes financières, en se basant sur le prix d'achat

du produit_déchet (pour le flux tiré), du prix de vente du produit régénéré et des coûts des actions du régénérateur (dépendant de la durée mise pour réaliser les actions).

A ces décisions s'ajoute celle portant sur le choix de la régénération qui doit être faite. En effet, un produit_déchet peut être revendu après remise en état ou être conservé par le régénérateur pour réparer d'autres produits_déchets. Pour effectuer ce choix le régénérateur doit considérer sa capacité de remise en état, le marché existant, l'impact environnemental de la remise en état, et ses besoins en pièces détachées.

Quelles actions de régénération ?

Une fois la décision de régénérer prise, le régénérateur doit déterminer les actions à réaliser pour remettre en état le produit_déchet, selon son état de santé, des capacités des régénérateurs à le remettre en état, et de la classe finale visée. En effet, l'écart existant entre la classe d'entrée du produit_déchet et la classe de sortie souhaitée du produit_nutriment impacte les actions à réaliser. Plus cet écart est important, plus les actions peuvent être nombreuses et donc coûteuses.

Le régénérateur doit également déterminer dans quel ordre les actions doivent être effectuées afin de minimiser la durée de remise en état, et par conséquent les coûts de régénération. En fonction des différentes possibilités d'ordonnancement des tâches de remise en état, le régénérateur doit estimer la durée maximale à ne pas dépasser pour satisfaire ses exigences économiques et celles de ses clients.

Quels clients ?

Les actions de régénération sont étroitement liées aux exigences clients. Ainsi, le régénérateur, en fonction de l'état de santé du produit_déchet qu'il reçoit en entrée, doit sélectionner parmi tous ses clients potentiels celui dont les exigences peuvent être satisfaites. Dans l'éventualité où plusieurs clients existent, le régénérateur doit déterminer celui qui permettra, par exemple, d'accroître le nombre de cycles d'utilisation tout en allongeant la durée de vie du produit, de réduire l'impact environnemental dû au transport du produit, et de dégager le plus de bénéfices.

Quels fournisseurs ?

Dans le cadre du flux tiré, les régénérateurs doivent trouver les fournisseurs qui vont leur permettre de satisfaire les demandes clients. Pour se faire, le régénérateur cherche à conjuguer :

- proximité et quantité, pour réduire les frais et l'impact des transports,

- qualité, c'est-à-dire, que le produit aura une classe d'entrée élevée permettant de réduire les coûts de remise en état,
- connaissances sur le produit, pour réduire les coûts de diagnostic,
- prix d'achat du produit, celui-ci doit être le plus faible possible pour ne pas pénaliser la remise en état et augmenter les bénéfices engendrés par le régénérateur.

Dans la suite de nos travaux, nous partons du principe que le fournisseur (flux tiré) maintient le potentiel de régénération de l'équipement sur l'ensemble de la durée d'exploitation du produit, que les actions de remise sont ordonnancées de manière à réduire au maximum les coûts de remise en état, et que les fournisseurs et les clients choisis sont les plus adaptés pour chaque produit_déchet reçu et produit_nutriment proposé à la vente.

III. Choix d'un modèle pour la modélisation du comportement d'un système complexe

Dans la littérature, les modèles permettant de modéliser le comportement d'un système sont nombreux (multi-agents, automates à état, réseaux bayésiens, SysML, System Dynamics, réseaux de neurones, réseaux de pétri...) (Boulanger and Bréchet, 2003; Bousquet et al., 2013; Johnson and Kerzhner, 2012; Lara-Rosano, 2015). Toutefois, tous ne sont pas adaptés à la modélisation de la régénération. En effet, celle-ci impose un certain nombre de contraintes qui doivent être respectées pour représenter au mieux le comportement d'un équipement et/ou de ses sous-ensembles au sein de la régénération, ainsi que les interactions entre les acteurs.

Dans un premier temps, nous identifions les contraintes de modélisation de la régénération. Dans un deuxième temps, nous détaillons les différents modèles retenus. Enfin, nous comparons ces modèles par rapport à nos exigences de modélisation.

1. Critères retenus pour la modélisation

La sélection d'un cadre de modélisation adapté à notre besoin repose sur une liste d'exigences nécessaires à la bonne modélisation de la régénération.

Le modèle doit, tout d'abord, permettre de modéliser des **comportements (continus et/ou discrets, linéaires ou non-linéaires, déterministes et stochastiques (par exemple, la modélisation de la fiabilité))**.

La régénération est un système complexe évoluant en fonction de relations internes et externes. Cette multitude de relations et d'interactions entre les parties prenantes de la régénération fait apparaître des **relations de causes-effets**, qui rendent son comportement difficile à prévoir. Ce type de relations apparaît également lorsque l'on se focalise sur le problème de raréfaction des ressources et d'accumulation des déchets, et sur la solution que nous proposons, avec les ajouts des régénérateurs et de la notion de nutriments.

Ces relations font parfois apparaître des **boucles de rétroaction** (les quantités de produits_déchets impactent celles des produits_nutriments qui impactent eux-mêmes celles des produits_déchets). Cette situation est d'autant plus amplifiée que nous sommes dans un contexte d'économie circulaire qui repose sur la mise en place de cycles en lieu et place de flux linéaires.

Les différentes données que doit traiter la régénération sont des **données quantitatives (fiabilité, consommation énergétique, ...)** ou **qualitatives (classe d'appartenance, ...)**. Par exemple, le diagnostic de remise en état caractérise l'état de santé d'un produit_déchet en se basant sur des classes, tandis que l'état de santé est évalué en fonction de la satisfaction d'une valeur d'exigences (consommation énergétique).

A ces exigences s'ajoute celle de la **simulation**. Il faut pouvoir montrer aux industriels l'apport de la régénération sur le plan écologique et économique. La simulation est un bon moyen d'y parvenir. D'autant plus que la modification de certains paramètres d'entrées met en évidence tel ou tel avantage ou désavantage, telle ou telle piste à exploiter, politique à mettre en place...

Nous souhaitons **suivre l'évolution des exigences du produit** au cours du temps, sur une période donnée et connaître leur **situation à un instant donné t** afin d'identifier, par exemple, l'instant où un changement est survenu dans le comportement de l'équipement et/ou de ses sous-ensembles, et où une solution n'est plus viable (ex : système ne répondant plus aux attentes de l'utilisateur, tant sur le plan performance qu'économique).

Finalement, nous avons besoin de pouvoir structurer le modèle en atomes de modélisation élémentaires, composables pour former des modèles de grande dimension adaptés à la problématique de la régénération.

2. Choix de la méthode de modélisation

Parmi les méthodes de modélisation du comportement des systèmes complexes au travers du temps présents dans la littérature, nous avons retenu : les automates hybrides,

les réseaux bayésiens dynamiques, les System Dynamics et les réseaux de neurones temporels. Dans la suite, ces méthodes sont décrites succinctement dans le but de déterminer celui qui est le plus à même de répondre aux exigences identifiées précédemment.

2.1. Présentation des méthodes

2.1.1. Automates hybrides

Les automates hybrides sont une extension des automates à états finis (Alur et al., 1993) qui permettent d'intégrer, sur un même modèle, un aspect discret et continu. L'aspect discret est représenté par un automate à états finis évoluant sur la base d'événements. L'aspect continu est représenté par un système d'équations différentielles associé à chaque état (Schwarze et al., 2013).

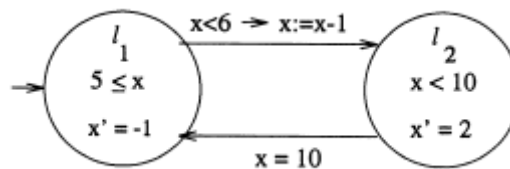


Figure 3.31 - Représentation d'un automate hybride

Dans cette approche hybride, les variables évoluent selon une alternance de pas continus (progression continue des variables d'état et du temps) et de pas discrets (franchissement instantané de plusieurs transitions discrètes) (Batis, 2013). L'état global d'un automate hybride, à un instant donné, est défini par une paire (q, x) où q décrit la situation (état discret) et x , le vecteur d'état (au sens continu) (Bouriachi et al., 2013).

Les automates hybrides permettent d'analyser et de commander des systèmes, en vérifiant certaines de leurs propriétés qualitatives et quantitatives. L'analyse repose sur des techniques de model-checking (Henzinger et al., 1997) (Alur et al., 1995), permettant de mieux appréhender l'évolution globale du système étudié, et d'imposer des hypothèses particulières (Derbel, 2009; Henzinger and Majumdar, 2000). Les informations obtenues à chaque étape d'évolution du système sont utilisées lors de la synthèse de la commande.

Bien que l'évolution de données au cours du temps et les comportements non linéaires puissent être modélisés à l'aide des automates hybrides, qu'il soit possible de structurer les modèles, ceux-ci ne permettent pas de répondre à un certain nombre d'exigences importantes pour la régénération, notamment la représentation des relations de causes-effets et des boucles de retour.

2.1.2. Réseaux bayésiens dynamiques

Les réseaux bayésiens dynamiques sont une extension des réseaux bayésiens statiques auxquels a été ajoutée une composante temporelle. Ils ont pour objectif de représenter des connaissances incertaines sur un phénomène complexe afin de mettre en place des raisonnements en lien avec ce phénomène (Hallouli and Likforman-Sulem, 2004).

Les réseaux bayésiens dynamiques sont des graphes composés d'arcs et de nœuds (Figure 3.32). Les nœuds représentent des variables (états, évènements...) reliées entre elles par des relations de causalités (arcs). Un arc ne peut relier que deux variables ensemble. Par contre, une variable peut être reliée à plusieurs autres variables (Weber and Simon, 2015). Ainsi, un arc reliant une variable X1 à une variable L13 signifie que X1 influence L13. En d'autres termes, X1 est un « parent » de L13, et L13 est un « enfant » de X1.

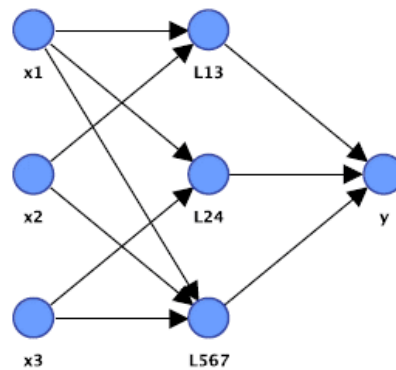


Figure 3.32 - Exemple de réseaux bayésiens - Extrait de (Weber and Simon, 2015)

Ces graphes sont acycliques et orientés, c'est-à-dire, qu'une variable enfant ne peut être parent d'un de ses parents, cela inclut ces ancêtres (parents de ses parents...). Ces variables peuvent être discrètes, continues, observables ou non, et peuvent prendre différents états (vrai, faux, valeurs, numéro d'états...) (Bouaziz, 2012).

L'aspect temporel dans les réseaux bayésiens dynamiques, se traduit par une indexation temporelle des nœuds. Cela permet de mettre en place des liens temporels et de définir les tables de probabilités conditionnelles des nœuds en fonction de leurs parents situés à des indices de temps inférieurs (Murphy, 2002).

Outre la représentation des liens de causalité, les réseaux bayésiens utilisent les informations relatives à l'état d'une variable X pour connaître l'état d'une variable Y, et cela peu importe le lien qui existe entre ces deux variables. Pour cela, ils s'appuient sur des axiomes et théorèmes de la théorie des probabilités (Boulanger and Bréchet, 2003). Toutefois, seules des quantités physiques peuvent être gérées.

L'intérêt des réseaux bayésiens, est que les tables de probabilités conditionnelles (arcs en variables) ainsi que les probabilités des événements peuvent être déterminées par apprentissage. Une structure de base du réseau doit être fixée par le modélisateur. L'apprentissage est une phase du développement de ces réseaux durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à la représentation de tous les événements rencontrés dans la base d'apprentissage et de toutes les relations de causes à effets.

Avec l'aspect temporel, la prise en compte de différentes natures de données, les réseaux bayésiens permettent de modéliser les relations de causes-effets entre des variables. La structuration des modèles est possible avec, par exemple, les réseaux bayésiens objets tels que développés dans (Medina-Oliva, 2011). Toutefois, aucun feedback n'est possible ce qui est un élément rédhibitoire pour notre objectif.

2.1.3. System Dynamics

Les System Dynamics ont été conçus dans les années 50 par Jay Forrester, afin de faciliter la compréhension et la prédiction du comportement des systèmes complexes (Radzicki, 2009) au travers de représentations graphiques et de simulations numériques.

Les System Dynamics sont de plus en plus utilisés dans le cadre de l'ingénierie système, et plus spécifiquement en Pensée Système, pour aider les ingénieurs à acquérir et développer une vision système. Ils servent à percevoir les systèmes dans leur environnement, à comprendre toutes les interactions impliquées pour construire par la suite les bonnes faisabilités systèmes. Les System Dynamics s'appuient sur deux types de représentations pour modéliser le comportement d'un système.

La première représentation met en avant les interactions qui existent entre différentes variables (Figure 3.33). Cette représentation permet de définir le comportement dynamique du système (Sterman, 2000). Ces interactions peuvent être à double sens. Une variable X peut influencer une variable Y, et dans le même temps, la variable Y peut influencer la variable X. Dans ce cas, on parle de boucle de retour.

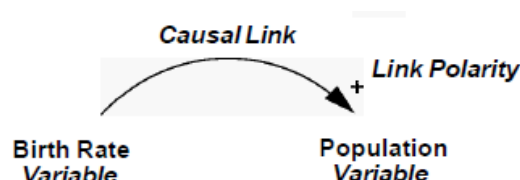


Figure 3.33 – Représentation des interactions entre variables (Extrait de (Sterman, 2000))

La seconde représentation met en avant le comportement de chaque variable au cours du temps grâce à des variables de stocks et flux (Figure 3.34). Les variables stocks

correspondent à des réservoirs qui se remplissent et/ou se vident en fonction des variables flux. Chacune de ces variables est instanciée par une équation mathématique traduisant son comportement (Wu and Xu, 2013). Ces équations permettent de faire interagir des variables qualitatives mais également quantitatives, puis de simuler le comportement des variables au cours du temps.

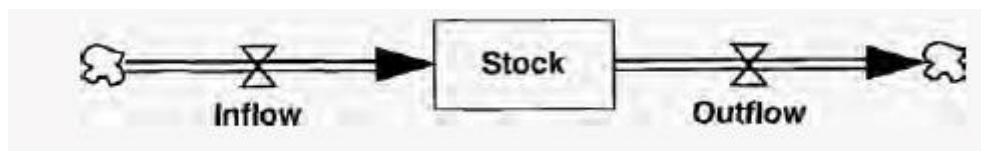


Figure 3.34 – Représentation d'une variable stock et de ses deux flux (Extrait de (Sterman, 2000))

De par les différents diagrammes et la simulation qu'ils proposent, les System Dynamics semblent adaptés à notre problématique de modélisation de la régénération, ils restent à un niveau de modélisation assez haut, mais suffisant pour notre utilisation.

2.1.4. Réseaux de neurones temporels

Les réseaux de neurones temporels sont une extension des réseaux de neurones intégrant la gestion de l'aspect temporel sous forme de récurrence de connexions ou par l'apparition d'une variable de temps sur les connexions entre les neurones (Zemouri, 2003).

Les réseaux de neurones s'inspirent des réseaux de neurones présents dans notre cerveau, et sont définis par (Touzet, 1992) comme étant « des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires (neurones) fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit ». Ces réseaux se composent de synapses (connexions, liens entre les neurones) et de neurones d'entrées, cachés et de sorties (Figure 3.35).

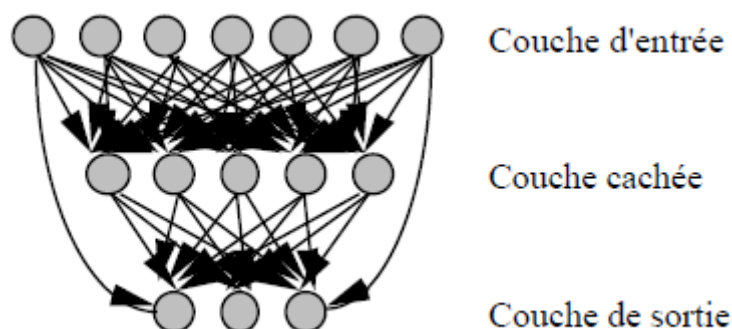


Figure 3.35 – Exemple de réseaux de neurones – Extrait de (Touzet, 1992)

Les neurones d'entrées sont stimulés par leur environnement et activent les synapses, en fonction du poids qui leur est associé (force de la connexion), puis les neurones cachés et les neurones de sorties. Chaque neurone possède une ou plusieurs variables d'entrées

mais une seule variable de sortie, et ne peut être activé que si la valeur d'activation associée (sur au moins un des synapses d'entrées) est atteinte. De manière générale, les informations sont portées par la valeur des poids associés aux synapses, tandis que la structure du réseau sert à traiter ces informations et à les acheminer vers la sortie (Baghli, 1999).

Le point fort de cette méthode est qu'elle se base sur l'apprentissage et ne nécessite aucune connaissance en particulier. L'apprentissage est une phase du développement de ces réseaux durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à obtention du comportement désiré (Dreyfus et al., 2002; Zemouri, 2003). Cet apprentissage modifie les poids associés à chaque neurone.

Les réseaux de neurones temporels sont des réseaux semblables à ceux détaillés ci-dessus avec une composante temporelle qui leur permet d'intégrer la notion de retard et de mémoriser les données d'entrée pendant une durée donnée (Zemouri, 2003).

Malgré la prise en compte de l'aspect temporel, il n'y a pas la possibilité d'avoir des retours (hormis pour l'apprentissage). Les réseaux de neurones ne permettent pas de modéliser les boucles de rétroaction qui sont un élément très important pour notre modélisation. De plus, il est difficile de structurer un modèle pour aborder des problèmes de grandes dimensions basées sur les connaissances du modélisateur.

2.2. Tableau de comparaison

Le (Tableau 3.3) résume les qualités attendues et satisfaites par les différents modèles présentés dans la section précédente.

Tableau 3.3 – Résumé des exigences satisfaites par les différentes méthodes retenues

	Comportement non-linéaire	Causes-effets	Boucles de rétroaction	Différents types de données	Suivi de l'évolution	Etat à un instant t	Structuration d'un modèle
Automates Hybrides	x			x		x	x
Réseaux Bayésiens Dynamiques	x	x		x	x	x	x
System Dynamics	x	x	x	x	x	x	x
Réseaux de neurones temporels	x	x		x	x	x	

Parmi tous les modèles retenus, les System Dynamics couvrent l'ensemble des exigences que nous nous sommes imposées.

C'est pourquoi, nous choisissons de retenir les System Dynamics. Les System Dynamics sont les plus à même d'aider les acteurs parties prenantes d'un écosystème d'entreprises à comprendre ce qu'est le paradigme de régénération, mais également à analyser et à choisir les meilleures options pour régénérer un produit.

IV. System Dynamics

Les System Dynamics sont une méthodologie systémique créée pour aider les gestionnaires d'entreprises à améliorer leur compréhension des processus industriels, au travers de scénarios et de simulations. Cette méthodologie a pour objectif modéliser, de faire comprendre et d'analyser des problèmes complexes liés à un système, en se focalisant sur ses interactions externes et internes (Forrester, 1961). En définissant correctement ces interactions et en les modélisant et simulant, les System Dynamics permettent d'évaluer les conséquences que peut avoir un changement (de politique, d'organisation,...) sur le système étudié, et de mettre en avant les relations critiques. Suite à cette identification, différents scénarios peuvent être exécutés jusqu'à trouver un paramétrage satisfaisant toutes les parties prenantes de l'étude. Ces scénarios permettent également de réduire significativement les coûts, notamment en ce qui concerne le domaine du social, de l'environnement, ou encore de la régénération (où les impacts ne sont pas toujours visibles à court terme).

Les modèles System Dynamics sont également de plus en plus utilisés pour former à la Pensée Système (System Thinking). En effet, ces modèles permettent de modéliser les interactions entre un système et son environnement, et les interactions entre les parties de ce système, et sont un outil très utile pour comprendre l'impact d'une évolution de l'environnement ou d'une partie d'un système sur l'ensemble. Avec les nouvelles politiques et nouveaux modèles socio-économiques liés au développement durable, les modèles System Dynamics sont de plus en plus utilisés pour comprendre, analyser et concevoir ces modèles... Par exemple, ils sont utilisés pour identifier les variables permettant de réduire les déchets au sein de l'hôpital en fonction de la population d'un pays et de son degré d'hygiène (Chaerul et al., 2008). Un autre exemple d'utilisation des System Dynamics est la modélisation de l'impact de l'ajout de points de collecte de produits hors d'usage sur la « close-loop supply chain », afin que ceux-ci soient recyclés et utilisés en tant que matières premières (Golroudbary and Zahraee, 2015). Ils sont également utilisés pour modéliser l'impact de politiques publiques sur des marchés (impact d'une prime à la casse sur le marché de l'automobile d'occasion),

La construction des System Dynamics se déroule en 4 grandes étapes (Sterman, 2000) :

- (1) **Création de boucles causales** qui représentent les interactions entre un système, son environnement et ses parties prenantes.
- (2) **Construction de diagrammes de stocks et flux**. Ces diagrammes sont une traduction des boucles causales via une identification de variables dites de « stocks » et de « flux ».
- (3) **Mise en équation** des variables présentes dans les diagrammes de stocks et flux.
- (4) **Simulation** du comportement du système à travers différents scénarios, et **analyse** de ces scénarios.

L'étape (1) permet d'appréhender un problème et de se focaliser sur les grandes influences et sur la mise en relief des boucles de rétroaction positives ou négatives. Les étapes (2) et (3) permettent de modéliser le comportement des différentes variables du problème. L'étape (4) permet de mettre en avant les variables pouvant accentuer ou éliminer ce problème.

Dans cette partie, nous allons développer la méthodologie de construction des modèles System Dynamics.

1. Diagrammes de boucles causales

En préambule à la construction des boucles causales, les parties prenantes participant au projet doivent identifier les variables nécessaires à la description du problème (Sterman, 2000). Par convention, les variables sont exprimées par des noms ou un groupe nominal qui décrivent de manière claire, concise et non ambiguë l'idée entendue par la variable.

Cette première étape réalisée, les interactions qui existent entre les variables identifiées sont modélisées au travers de relations de causes-effets.

Ces interactions sont représentées par des **flèches polarisées**. Cette polarité décrit le type d'influence qu'à une variable sur une autre. La **polarité « S »** (Same) signifie que les deux variables évoluent dans le même sens. A l'inverse, la **polarité « O »** (Opposite) signifie que les deux variables évoluent dans des sens opposés. Si une des variables diminue, alors l'autre augmente.

Dans certains diagrammes de boucles causales, ces interactions font apparaître des **boucles de rétroaction** (feedback loops), c'est-à-dire, que des variables s'influencent entre elles. Ces boucles sont définies comme étant soit des boucles de renforcement, soit des boucles de balance.

Une **boucle de renforcement**, symbolisée par un « R », est un cycle dans lequel une variation, au niveau d'une variable, se propage à travers toute la boucle et vient renforcer l'état initial de la variable à l'origine de la variation. En d'autres termes, si une variable augmente, la propagation de cette augmentation dans la boucle vient augmenter cette même variable. Ce type de boucles est à éviter car il conduit à des situations de divergence.

Une **boucle de balance « équilibre »**, symbolisée par un « B », est un cycle dans lequel une variation, au niveau d'une variable, se propage à travers toute la boucle et vient dévier l'état initial de la variable à l'origine de la variation. Par exemple, si une variable augmente, la propagation de cet effet a pour impact la diminution de la variable initiale. Ces boucles sont vertueuses et conduisent à des situations d'équilibre à court ou moyen terme.

Les diagrammes de boucles causales permettent également de mettre en avant les **retards/délais**, symbolisés par un double trait sur la flèche polarisée (Figure 3.36). En indiquant ces retards, le lecteur du diagramme peut identifier directement une interaction qui peut potentiellement devenir problématique à terme, si le délai est trop long ou trop court.

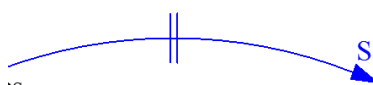


Figure 3.36 – Représentation du délai sur une interaction entre variables

2. Diagrammes de stocks et flux

Les diagrammes de stocks et flux reposent sur deux grands types de variables : les **stocks** et les **flux**. Le (Tableau 3.4) identifie les types de stock et flux couramment rencontrés dans certains domaines d'application.

Tableau 3.4 - Terminologies utilisées selon le domaine de compétences - Extrait de (Sterman, 2000)

Field	Stocks	Flows
Mathematics, physics and engineering	Integrals, states, state variables, stocks	Derivatives, rates of change, flows
Chemistry	Reactants and reaction products	Reaction rates
Manufacturing	Buffers, inventories	Throughput
Economics	Levels	Rates
Accounting	Stocks, balance sheet items	Flows, cash flow or income statement items
Biology, physiology	Compartments	Diffusion rates, flows
Medicine, epidemiology	Prevalence, reservoirs	Incidence, infection, morbidity and mortality rates

Une variable de type **stock** (Figure 3.37 - a) représente l'**accumulation d'un élément à tout instant**, et est comparée à un réservoir se remplissant et/ou se vidant. Le remplissage et la vidange du stock se fait selon des variables d'entrées et de sorties, que sont les variables flux.

Une variable de type **flux** (Figure 3.37 - b) représente une **quantité qui s'écoule dans le temps**, et est comparée à une vanne remplissant/vidant un réservoir. Les nuages aux extrémités indiquent que le flux d'arrivée se fait depuis une source et vers un puits sans limite.

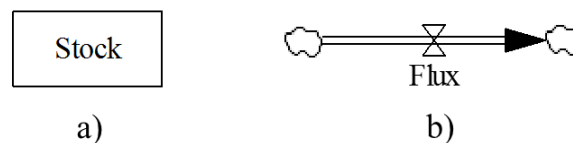


Figure 3.37 - Représentation des variables stock (a) et flux (b)

Des variables auxiliaires viennent compléter les stocks et les flux. Ces variables peuvent être de différents types : numérique, logique, énumérées,... Elles viennent influencer l'évolution des flux ou s'influencer entre elles. Les variables auxiliaires permettent d'introduire la notion de délai ou retard temporel sur une causalité.

Dans l'outil VENSIM de la société Ventana Inc. utilisé dans le cadre de notre thèse, un ensemble de patrons de conception « Molecules of Structure – Building Blocks for System Dynamics Models »⁹ sont proposés, sous la forme de motifs de base modélisant des situations types et leurs évolutions temporelles, qui peuvent être associés pour former des modèles plus conséquents.

3. Mise en équations et simulations

Les différents diagrammes que nous venons d'aborder sont constitués de relations cause-effet qui doivent être formalisées et quantifiées. La formalisation se fait à l'aide de fonctions mathématiques. Ces fonctions peuvent être discrètes ou continues.

Dans le cas le plus simple, une fonction est constituée des quatre opérations de base (+, -, *, /). Dans les cas plus complexes, elle utilise une séquence de fonctions mathématiques soumises à des conditions logiques : EXP, IF THEN ELSE, RANDOM, MIN, MAX, SIN, RAMP... C'est dans cette étape de la formalisation que les délais sont pris en compte, au travers de fonctions de type « DELAY ».

Molecules of Structure – Building Blocks for System Dynamics Models , version 2.02, Jim Hines, 2005, www.vensim.com⁹

La difficulté de la formalisation des diagrammes de stock et flux vient du fait que chaque variable a sa propre formalisation. De plus, pour en simplifier la compréhension, chaque équation ne doit faire apparaître qu'une seule idée. Cette simplification passe par l'ajout de variables auxiliaires, permettant une interprétation plus aisée de chaque équation. Lors de la mise en équation, les variables « de simplification » doivent être ajoutées sur le diagramme de stocks et flux concerné.

Une fois la formalisation faite, ou en parallèle de celle-ci, il faut instancier certaines variables, c'est-à-dire, qu'il faut figer les points de départ du modèle, ce qui s'apparente à une initialisation des variables. Les stocks et les constantes sont concernés par cette initialisation.

Lorsque la phase d'instanciation est réalisée, il est possible de passer à la phase de simulation afin d'analyser l'évolution du système et de faire des propositions de solutions au problème traité. Cette simulation permet d'analyser les dynamiques possibles, de montrer les risques de divergence ou de stabilisation, de visualiser les compensations, ... à l'aide de graphes temporels.

V. Modélisation de la régénération des produits_déchets – Patterns (Contribution 4)

Chaque modélisation en System Dynamics étant réalisée pour répondre à un problème ou vérifier le bien-fondé d'une solution, nous proposons pour illustrer leur utilisation de modéliser la solution de régénération industrielle. Cette solution peut être énoncée comme suit : « la production de **produits neufs** puise des **matières premières** naturelles qui s'épuisent au cours du temps et des extractions. L'utilisation des **produits_déchets** et leur transformation en **produits_nutriments** permet de diminuer l'épuisement des ressources ».

La solution énoncée ci-dessus peut être modélisée, à haut niveau, selon (Figure 3.38). Ainsi, grâce à la notion de produits_nutriments, la production de produits neufs diminue, et par conséquent les quantités de matières premières non exploitées augmentent. Ce phénomène s'amplifie lorsque le nombre de produits_déchets régénérés augmente. Ces différentes évolutions sont dues aux transformations opérées par les régénérateurs. C'est pourquoi, notre attention se focalise sur la relation existant entre produits_déchets et produits_nutriments dont l'existence dépend des régénérateurs. Pour cela, nous avons

besoin de modèles permettant de vérifier si un produit_déchet est régénérable, et si oui, par quel régénérateur, et à quelles conditions.

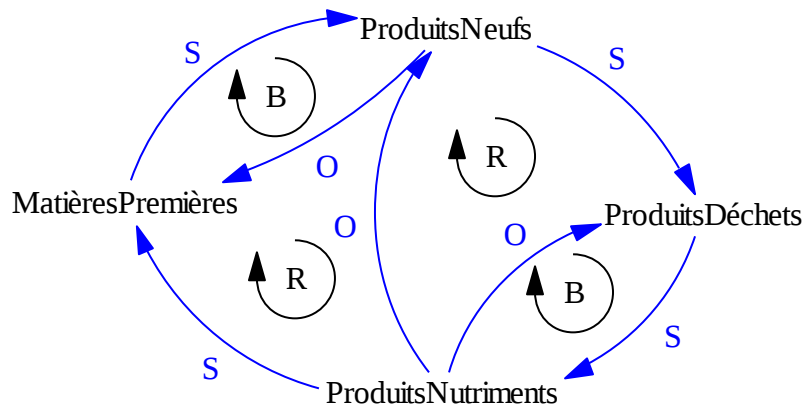


Figure 3.38 - Modélisation en boucles causales de la solution de régénération industrielle

C'est pourquoi, dans cette partie, nous modélisons la régénération des produits_déchets à l'aide des System Dynamics, et proposons des modèles génériques permettant aux industriels de les instancier sur leur cas d'étude.

La modélisation se fait en 3 étapes :

- Modélisation de l'état de santé du produit tout au long du cycle d'utilisation,
- Modélisation des exigences d'utilisation et de régénération sur le produit,
- Modélisation des exigences sur les processus de régénération.

1. Modélisation du cycle de vie du produit

La modélisation du comportement du produit doit permettre de connaître à tout instant la phase de vie dans laquelle se situe le produit, et l'état de santé de celui-ci dans chaque phase de vie.

1.1. Evolution du produit dans les phases de vie

Dans nos modèles, nous nous focalisons sur deux phases de vie : l'utilisation et la régénération.

1.1.1. Passage d'une phase de vie à une autre

Pour déterminer si les valeurs associées aux variables des exigences produit se dégradent ou s'améliorent, il est nécessaire de savoir dans quelle phase de vie se trouve le produit_déchet. Dans nos travaux, nous nous focalisons uniquement sur les phases d'utilisation et de régénération. Le produit est donc successivement dans une phase d'utilisation puis de régénération, puis de nouveau d'utilisation... jusqu'à ce qu'il ne puisse plus être régénéré (Figure 3.39).

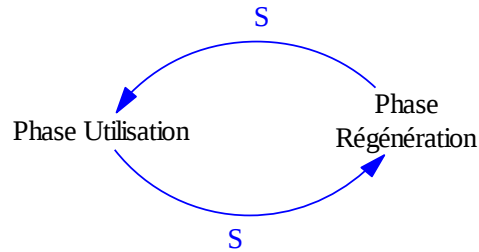


Figure 3.39 – Etats dans lesquels peut être un produit

Nous proposons de modéliser ces phases par une variable stock (Figure 3.40) que nous utilisons comme un indicateur nous permettant de connaître, à tout instant, la phase de vie dans laquelle se situe le produit (Équation 3.1). Ce stock est initialisé à 1, pour signifier que le produit est en cours d'utilisation au début des simulations, et s'incrémente de 1 (*Incrémentation* = 1) dès l'instant où le produit n'est plus utilisé (*Arret Utilisation* = 1) (Équation 3.2) (la valeur du stock passe à 2). La valeur du stock est égale à 2 tant que la régénération n'est pas terminée (*Fin Régénération* = 1), ce qui permet une décrémentation de la valeur du stock de 1 (*Décrémentation* = 1) (Équation 3.3). En d'autres termes, le produit_nutriment a trouvé un acquéreur. Ainsi, lorsque le stock est égal à :

- 1 : le produit (équipement) est en utilisation,
- 2 : le produit_déchet est en régénération.

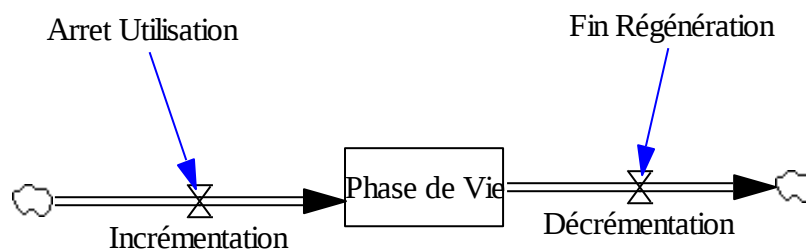


Figure 3.40 - Indicateur de la phase de vie parcourue par le produit

Équation 3.1

$$\text{Phase de vie} = \text{Incrémentation} - \text{Décrémentation}$$

Équation 3.2

$$\text{Incrémentation} = \begin{cases} 1, & \text{Arret Utilisation} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 3.3

$$\text{Décrémentation} = \begin{cases} 1, & \text{Fin Régénération} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

1.1.2. Activités de régénération

La phase d'utilisation étant propre à chaque utilisateur, nous ne modélisons que l'évolution du produit_déchet au sein des régénérateurs. Chaque régénération est composée d'une succession d'activités qui sont validées après une durée d'exécution associée à chaque activité, c'est-à-dire, qu'il existe un délai entre les activités, excepté entre la fin de la régénération et la phase d'utilisation, car nous faisons l'hypothèse que la régénération se termine à l'instant où le produit_nutriment a trouvé un acquéreur (Figure 3.41).

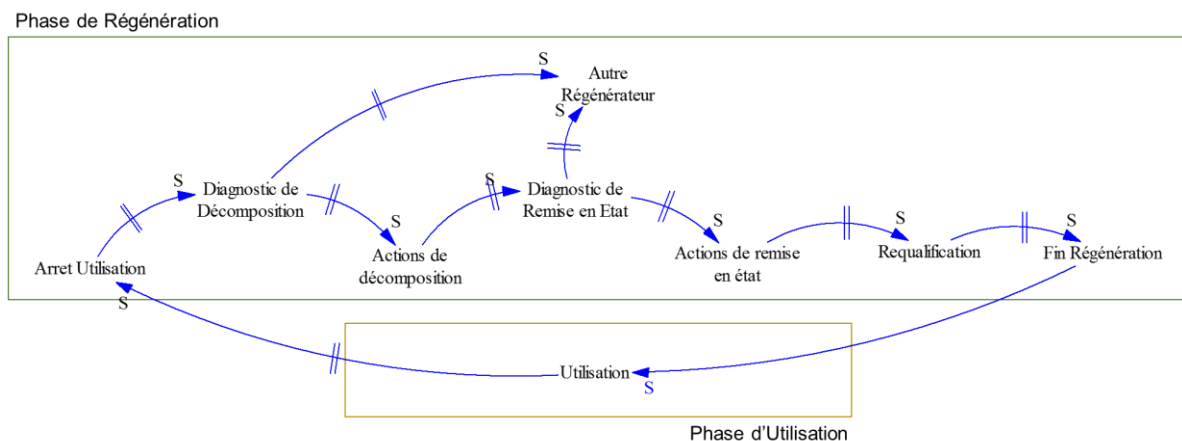


Figure 3.41 - Succession des activités au sein des régénérateurs

Diagnostiques de décomposition et de remise en état

Les activités de diagnostic sont représentées par des variables auxiliaires qui changent de valeur lorsque la précédente est satisfaite ou lorsque le délai pour réaliser l'action est terminé. Toutefois, entre le début et la fin du diagnostic, le diagnostic prend une décision quant au fait de décomposer (Figure 3.42) ou de remettre en état (Figure 3.43) le produit_déchet.

La prise de décision de décomposer ou non le produit_déchet en vue de sa régénération dépend du début du diagnostic, de la satisfaction des exigences de régénération et des exigences processus (Figure 3.42). La fin du diagnostic de décomposition est validée lorsque la prise de décision de décomposer le produit_déchet est validée (*Prise de Décision Décomposition* = 1) (Équation 3.4) et que le délai pour réaliser le diagnostic soit écoulé (Équation 3.5). Dans l'éventualité où le produit_déchet ne peut être décomposé (prise de décision = 2), alors le produit_déchet est envoyé vers un autre régénérateur (Équation 3.6). Lorsqu'aucun produit_déchet n'est à décomposer, « *Prise de Décision Décomposition* » est égale à 0.

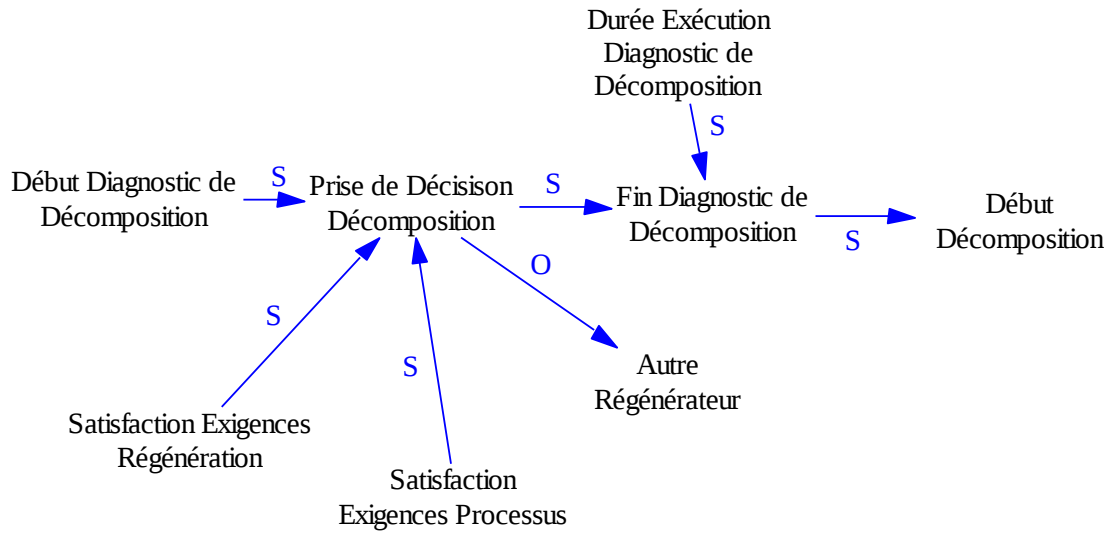


Figure 3.42 – Succession des activités de diagnostic de décomposition

Équation 3.4

Prise de Décision Décomposition

$$= \begin{cases} 1, & \text{Début Diagnostic de Décomposition} = 1 \text{ et} \\ & \text{Satisfaction Exigences Régénération} = 1 \text{ et Satisfaction Exigences Processus} = 1 \\ 2, & \text{Début Diagnostic de Décomposition} = 1 \text{ et} \\ (\text{Satisfaction Exigences Régénération} = 0 \text{ ou Satisfaction Exigences Processus} = 0) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Où Satisfaction Exigences Régénération} = \begin{cases} 1, & \text{Etat de Santé Régénération} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Et Satisfaction Exigences Processus} = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n EProci = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 3.5

Fin Diagnostic de Décomposition

$$= \begin{cases} 1, & \text{Prise de Décision Décomposition} = 1 \text{ et} \\ & \text{DELAY}(\text{Prise de Décision Décomposition}, \text{Durée Exécution Diagnostic de Décomposition}, \\ & \text{Prise de Décision Décomposition}) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 3.6

$$\text{Autre Régénérateur} = \begin{cases} 1, & \text{Prise de Décision Décomposition} = 2 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Le déroulement de l'activité de diagnostic de remise en état (Figure 3.43) est semblable au diagnostic de décomposition, excepté que la prise de décision porte sur la satisfaction des exigences d'utilisation (Équation 3.7).

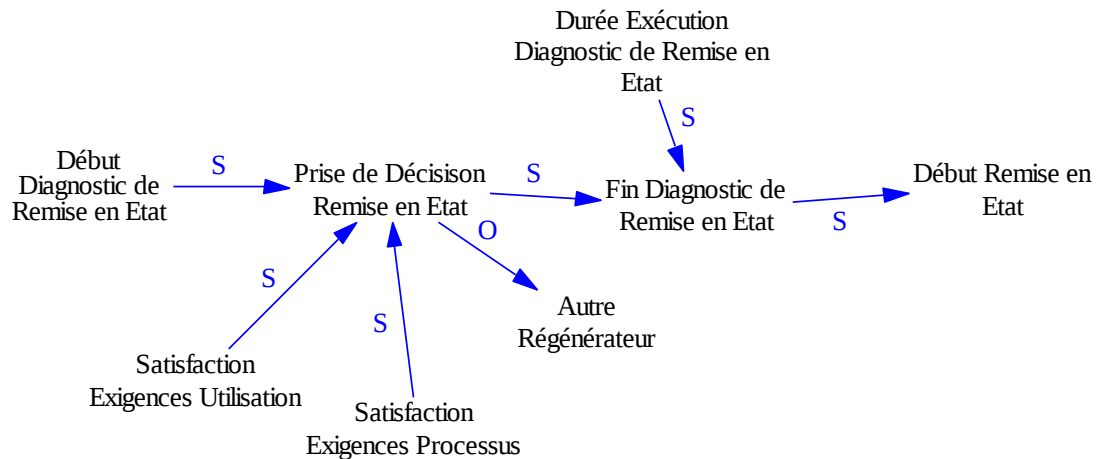


Figure 3.43 - Succession des activités de diagnostic de remise en état

Équation 3.7

Prise de Décision Remise en Etat

$$= \begin{cases} 1, & \text{Début Diagnostic de Remise en Etat} = 1 \text{ et} \\ & \text{Satisfaction Exigences Utilisation} = 1 \text{ et Satisfaction Exigences Processus} = 1 \\ 2, & \text{Début Diagnostic de Remise en Etat} = 1 \text{ et} \\ & (\text{Satisfaction Exigences Utilisation} = 0 \text{ ou Satisfaction Exigences Processus} = 0) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Où Satisfaction Exigences Utilisation} = \begin{cases} 1, & \text{Satisfaction Etat de Santé Utilisation} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Et Satisfaction Exigences Processus} = \begin{cases} 1, & \sum_{j=1}^{j=n} EProcj = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Actions de décomposition et de remise en état

Les actions de décomposition et de remise en état sont représentées, dans les diagrammes de stocks et flux, par des variables auxiliaires qui changent de valeur lorsque la précédente action est terminée ou lorsque le délai pour réaliser l'action est terminé. Ainsi, pour l'exemple de l'action de décomposition (Figure 3.44), celle-ci commence dès lors que le diagnostic de décomposition se termine (Équation 3.8). La décomposition est terminée dès que toutes les actions ont été réalisées (Équation 3.9), ce qui permet ensuite de passer au diagnostic de remise en état (Équation 3.10). L'Équation 3.9 s'interprète comme suit : la variable « *Fin Décomposition* » est une image de la variable « *Début Décomposition* » mais avec un décalage de « *Durée Exécution Décomposition* » dans le temps. Ces équations s'appliquent également aux actions de remise en état et de requalification (Annexe – Chapitre 3).

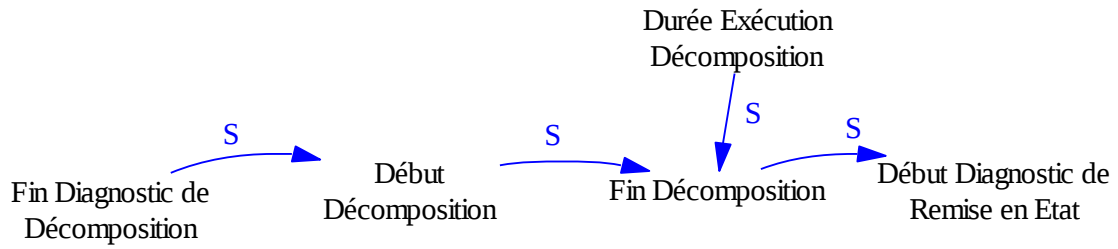


Figure 3.44 - Succession des activités de décomposition

Équation 3.8

$$\text{Début Décomposition} = \begin{cases} 1, & \text{Fin Diagnostic de Décomposition} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 3.9

Fin Décomposition

$$= \text{DELAY}(\text{Début Décomposition}, \text{Durée Exécution Décomposition}, \text{Début Décomposition})$$

Équation 3.10

$$\text{Début Diagnostic de Remise en Etat} = \begin{cases} 1, & \text{Fin Décomposition} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Une fois les actions de décomposition réalisées, le produit_déchet passe par le diagnostic de remise en état pour déterminer si le régénérateur est apte à le remettre en état, et si cette remise en état est conforme aux exigences des processus de régénération.

Requalification

Une fois, les diagnostics et les actions de décomposition et de remise en état effectués, le produit_déchet devient un produit_nutriment dont l'état de santé d'utilisation doit être caractérisé pour être mis en vente, et valider la fin de la régénération (*Fin Régénération* = 1) (Figure 3.41).

Pour réaliser cette caractérisation, les régénérateurs s'appuient sur les seuils de classes pour chaque variable associée aux exigences d'aspect physique et d'état technique. La Figure 3.45 représente les relations existant entre la classe d'aspect physique et la classe associée à chaque variable d'exigences d'aspect physique. Celle de l'état technique est représentée de la même manière.

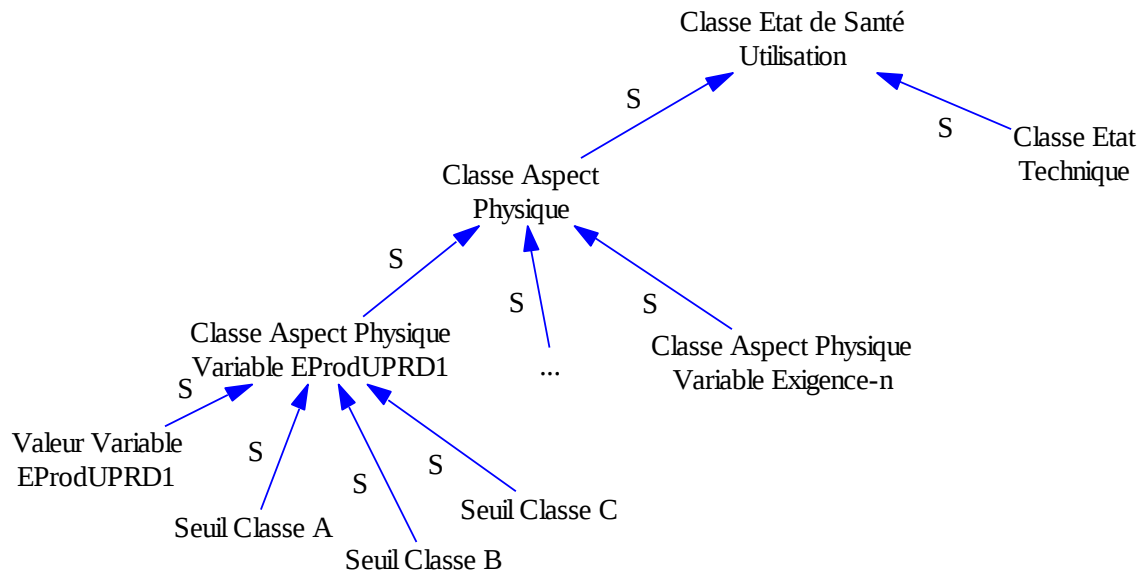


Figure 3.45 - Classe de l'état de santé d'utilisation en fonction des classes de l'aspect physique et de l'état technique – exemple sur l'exigence EProdUPRD1 (taux de rayures) et sur 3 classes

Les Équation 3.11 et Équation 3.12 représentent l'évaluation de la classe satisfaite par la variable associée à l'exigence EProdUPRD1, et celle de l'aspect physique.

Équation 3.11

Classe Aspect Physique Variable EProdUPRD1

$$= \begin{cases} A, & \text{Valeur Variable EprodUPRD1} \leq \text{Seuil Classe A} \\ B, & \text{Seuil Class A} > \text{Valeur Variable EprodUPRD1} \geq \text{Seuil Classe B} \\ C, & \text{Seuil Class B} > \text{Valeur Variable EprodUPRD1} \geq \text{Seuil Classe C} \end{cases}$$

Équation 3.12

Classe Aspect Physique

$$= \begin{cases} A, & \sum_{i=1}^{i=n} \text{Classe Aspect Physique Variable Exigence}_i = A \\ B, & \text{Classe Aspect Physique Variable EProdUPRD1} = B \text{ ou } \dots \text{ ou } \\ & \text{Classe Aspect Physique Variable Exigence}_n = B \\ C, & \text{Classe Aspect Physique Variable EProdUPRD1} = C \text{ ou } \dots \text{ ou } \\ & \text{Classe Aspect Physique Variable Exigence}_n = C \end{cases}$$

Pour qu'un produit_déchet évolue au sein des régénérateurs, et que le produit_nutriment puisse être caractérisé en vue de mise en vente, il est nécessaire de modéliser l'évolution de son état de santé.

1.2. Evolution de l'état de santé du produit

Pour déterminer l'état de santé du produit, il faut étudier l'évolution de son état de santé lors de l'utilisation et de la régénération (Figure 3.46).

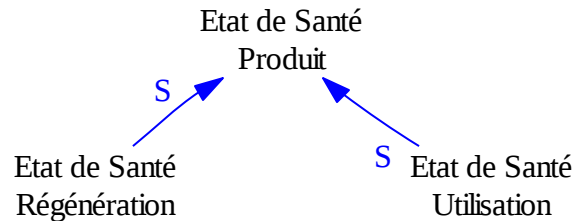


Figure 3.46 - Etat de Santé du produit

Ces états de santé varient en fonction de l'évolution des valeurs associées aux variables des exigences d'utilisation et de régénération, qui varient, elles-mêmes, en fonction de la phase de vie dans laquelle se situe le produit (utilisation ou régénération) (Figure 3.47).

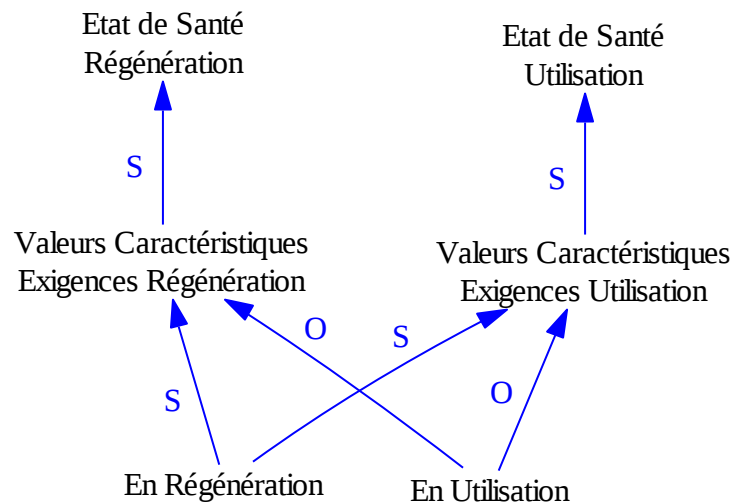


Figure 3.47 - Caractérisation de l'état de santé régénération et utilisation en fonction des valeurs des exigences associées et de la phase de vie du produit

Ainsi, pour que l'état de santé régénération soit satisfait, il faut que l'ensemble des exigences qui lui sont associées soient vérifiées (Figure 3.48) (Équation 3.13).

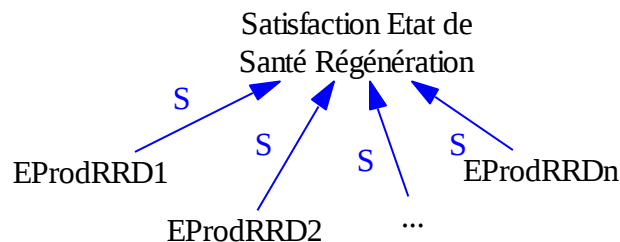


Figure 3.48 – Satisfaction de l'état de santé régénération

Équation 3.13

$$Satisfaction\ Exigences\ Régénération = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{i=n} EProdRRDi = 1 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

L'état de santé utilisation dépend de l'aspect physique et de l'état technique du produit_déchet (Figure 3.49). Pour prendre la décision de remettre en état, il est nécessaire de vérifier l'Équation 3.14, c'est-à-dire, vérifier que le produit_déchet a un aspect physique et un état technique qui répondent aux exigences.

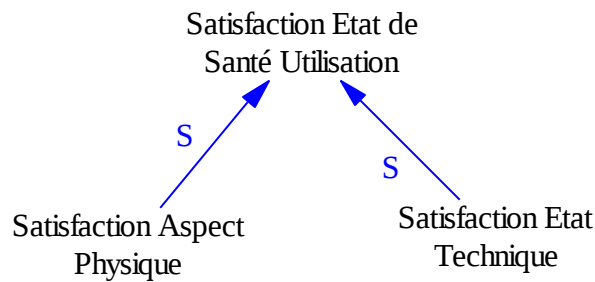


Figure 3.49 – Satisfaction de l'état de santé utilisation

Équation 3.14

Satisfaction Etat de Santé Utilisation

$$= \begin{cases} 1, & Satisfaction\ Aspect\ Physique = 1\ et\ Satisfaction\ Etat\ Technique = 1 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

La satisfaction de l'aspect physique (Équation 3.15) et de l'état technique (Équation 3.16) est conditionnée par le respect de l'ensemble des exigences qui leur sont associées (Figure 3.50).

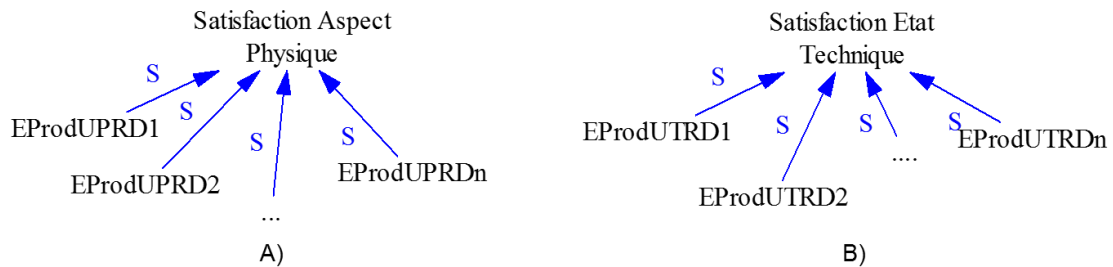


Figure 3.50 - Satisfaction de l'aspect physique (A) et de l'état technique (B)

Équation 3.15

$$Satisfaction\ Aspect\ Physique = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{i=n} EProdUPRDi = 1 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Équation 3.16

$$Satisfaction\ Etat\ Technique = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{i=n} EProdUTRDi = 1 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Les valeurs associées aux variables des exigences de régénération ($EProdRDi$), à l'aspect physique ($EProdUPRDi$) et à l'état technique ($EProdUTRDi$) se dégradent lorsque le produit (équipement) est en utilisation et s'améliorent lorsqu'il est en régénération. Ce comportement peut être modélisé, en diagrammes de stocks et flux, par :

- une variable auxiliaire dont les valeurs sont égales à 0 ou 1 en fonction de la satisfaction de la variable de l'exigence (Équation 3.17),

Équation 3.17

$$Exigence = \begin{cases} 1, & Variable\ Exigence\ satisfaite = 1 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

- une variable stock dont la valeur varie en fonction de l'état dans lequel se situe le produit (Figure 3.51), et du temps qui s'écoule. De manière générale, les valeurs associées à la variable stock (Équation 3.18) se dégradent lorsque le produit (équipement) est en utilisation (usure) (Équation 3.19) et s'améliore lorsqu'il est en régénération (Équation 3.20).

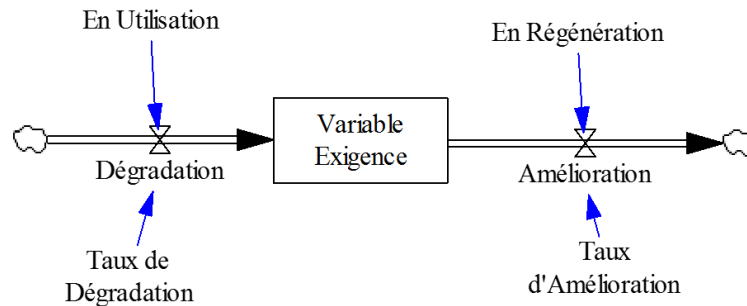


Figure 3.51 - Pattern de modélisation d'exigences d'utilisation évoluant en fonction de l'état (utilisation ou régénération) dans lequel se trouve le produit

Équation 3.18

$$Variable\ Exigence = Dégradation - Amélioration$$

Équation 3.19

$$Dégradation = \begin{cases} Taux\ de\ Dégradation, & En\ Utilisation = 1 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Équation 3.20

$$Amélioration = \begin{cases} \text{Taux d'Amélioration}, & \text{En Régénération} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Les valeurs associées aux variables des exigences produit permet de déterminer, lors des activités de diagnostic de remise en état, de remise en état et de requalification, si les exigences sont satisfaites ou non. L'expression de ces exigences est donnée dans la section suivante.

2. Prise en compte des exigences produit

Afin de déterminer si le produit_déchet peut être régénéré par un régénérateur, celui-ci impose des exigences sur le produit qu'il reçoit.

Exigences de régénération

Les exigences de régénération évaluent la possibilité de décomposer un produit_déchet lors de la régénération. Ainsi, si une seule de ces exigences n'est pas satisfaite, le produit_déchet est envoyé vers un autre régénérateur. Deux exemples de satisfaction des exigences régénération sur le diagnostic de décomposition au désassemblage sont données dans (Équation 3.21) et (Équation 3.22).

Équation 3.21

$$EProdRRD1 = \begin{cases} 1, & \text{vis dévissables} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 3.22

$$EProdRRD2 = \begin{cases} 1, & \text{tenons non cassés} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Exigences d'utilisation

Les exigences d'utilisation influencent la remise en état d'un produit_déchet, et dépendent de la satisfaction de la variable de l'exigence. Par exemple, l'exigence « EProdUPRD1 – Tous les câbles d'alimentation doivent être présents sur le produit_déchet » est traduite selon l'Équation 3.23.

Équation 3.23

$$EProdUPRD1 = \begin{cases} 1, & \text{Câbles d'alimentation présents} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Les exigences d'utilisation dépendent également de la classe que le régénérateur souhaite atteindre pour le produit_nutriment. Ainsi, si le régénérateur veut un produit_nutriment de classe B (EProdURN1) alors que le produit_déchet est de classe C, le régénérateur doit s'assurer que toutes les exigences d'utilisation, et plus particulièrement les exigences d'aspect physique et d'état technique soient de classe B, ou qu'il soit en mesure de faire passer le produit_déchet en classe B lors de la remise en état (par exemple, réduction du taux de rayures de 2% - EProc1). Ainsi, sur l'exemple des rayures, l'exigence sur le taux de rayures est satisfaite (EProdUPRD2.1 - Équation 3.24) si le taux sur le produit_déchet est inférieur ou égal au seuil maximal de rayures autorisées par le régénérateur (seuil bas de la classe B + valeur max de ce que peuvent apporter les actions de remise en état).

Équation 3.24

$$EProdUPRD2.1 = \begin{cases} 1, & \text{Taux de Rayures} \leq 5\% \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Où 5% = Seuil bas classe B (3%) + 2%

3. Prise en compte des exigences processus

Afin de déterminer s'il est en mesure d'effectuer la régénération du produit_déchet, le régénérateur s'impose des exigences au niveau de ses processus.

Exigences Processus

Les exigences processus influencent la décomposition à la régénération et la remise en état du produit_déchet, et dépendent uniquement des exigences que le régénérateur s'impose pour réaliser l'ensemble de la régénération. En exemple, nous pouvons citer l'exigence EProc1 sur le taux de rayures que le régénérateur estime pouvoir enlever (Équation 3.25), et l'exigence EProc2 sur les outils disponibles pour faire la décomposition à la régénération (Équation 3.26).

Équation 3.25

$$EProc1 = \begin{cases} 1, & \text{Taux de rayures enlevables} \geq 2\% \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 3.26

$$EProc2 = \begin{cases} 1, & \text{Outils disponibles} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Les modèles et les équations que nous proposons peuvent devenir des molécules de bases, pouvant être instanciées avec des données spécifiques pour un cas d'application particulier.

4. Simulation et interprétation

Après instanciation des modèles, il est possible d'évaluer différents critères en observant certaines variables. Parmi ces critères, nous pouvons citer en exemple ceux donnés dans Tableau 3.5. Dans le cas où les résultats observés ne correspondent pas aux attentes des industriels, ceux-ci ont la possibilité d'identifier l'origine du problème et de faire varier leurs paramètres pour valider un objectif particulier.

Tableau 3.5 - Critères observables lors des simulations des modèles de stocks et flux sur la régénération d'un produit

Critère observable	Variables/Exigences à observer	Valeur de variables à modifier si non satisfaction des attentes
Différence entre la classe du produit_déchet et du produit_nutriment	Exigence « EProdURD1 » portant sur la classe satisfaite par le produit_déchet Variable « Classe Etat de Santé » portant sur la classe satisfaite par le produit_nutriment	Niveau de la classe de produit_déchet Capacités de remise en état
Durée de vie moyenne des produits	Date à laquelle : « <i>Prise de Décision Décomposition</i> » = 2 ou « <i>Prise de Décision Remise en Etat</i> » = 2	Niveau de la classe des produits_nutriments Durée d'utilisation max par utilisateur (flux tiré)
Taux de produits_nutriments	« <i>Fin Régénération</i> » = 1	Capacité de décomposition Capacités de remise en état Niveau de la classe des produits_déchets Niveau de la classe des produits_nutriments
Taux de produits_déchets décomposés	« <i>Prise de Décision Décomposition</i> » = 1	Capacité de décomposition
Taux de produits_déchets remis en état	« <i>Prise de Décision Remise en Etat</i> » = 1	Capacités de remise en état
Taux de produits_déchets	« <i>Prise de Décision Décomposition</i> » = 2	Capacité de décomposition

allant vers un autre régénérateur	ou « <i>Prise de Décision Remise en Etat</i> » = 2	Capacités de remise en état
-----------------------------------	--	-----------------------------

Les parties prenantes (fournisseurs, régénérateurs, clients) peuvent également observer les critères portant sur les coûts. Pour cela, il faudrait modéliser le comportement des coûts en s'appuyant sur les modèles et équations développés pour représenter le comportement du produit. Ce point n'est pas traité dans notre étude de cas.

VI. Conclusion

Afin de modéliser et simuler les relations de causes-effets et les boucles de retour, nous avons sélectionné les « System Dynamics ». Cet outil permet, au travers de divers diagrammes et de simulations, de mettre en avant les variables qui peuvent poser problème lorsque le système de régénération est en fonctionnement, et qui doivent être surveillées. Il permet également, en fonction de différents scénarios, de déterminer les meilleurs paramètres pour répondre à une problématique.

Dans ce chapitre, après avoir modélisé la régénération sous forme de boucles causales, nous avons défini et modélisé des patterns des stocks et flux et d'équations pour les variables indispensables à l'évaluation de la régénération. Ainsi nous avons proposé des patterns pour le comportement du produit et des processus de régénération.

Dans nos modèles, nous ne modélisons pas l'apport économique de la régénération. Pour cela, les industriels (fournisseurs, régénérateurs, clients) doivent modéliser le comportement des coûts en fonction des ventes, achats et actions qu'ils réalisent. La modélisation des bénéfices engendrés peut être faite à l'aide d'une variable stock qui se vide en fonction des dépenses réalisées et se remplit en fonction des ventes.

Dans le chapitre suivant, nous nous proposons d'illustrer la régénération industrielle en instanciant les modèles proposés dans ce chapitre. Ce cas d'application doit nous permettre de montrer le bien-fondé de la régénération que ce soit par la mise en place du flux poussé ou du flux tiré, et de montrer que l'outil d'aide à la décision, par la simulation proposée, peut aider les industriels à identifier les paramètres sur lesquels jouer pour répondre à des exigences portant sur des quotas de classes de produits_nutriments à atteindre.

Chapitre 4 : Applications

I. Introduction

Dans le cadre de la transition énergétique, le gouvernement français a mis en place une loi portant sur le réemploi de pièces détachées dans le milieu automobile (LOI 2015-992 - Am.798, 2016). Cette loi oblige les garagistes à proposer des pièces de seconde main à leurs clients lors de la réparation et/ou de l'entretien de leur véhicule.

En étendant cette loi à d'autres domaines, le marché de l'occasion deviendrait florissant, et les besoins en matières premières devraient réduire, notamment ceux des métaux et terres rares. L'un des domaines les plus gourmands en terres rares est celui des équipements électroniques/électroniques.

Les déchets émergeant de ce domaine (D3E – Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques) représentent un gisement évalué à 1,5 millions de tonnes en France en 2014 (ADEME, 2016). De par leur complexité, leur diversité et la fluctuation de leur arrivée dans les centres de tri, les D3E sont complexes à gérer (Alonso Movilla, 2016), expliquant leur faible taux de réemploi.

Les D3E correspondent au gros et petit électroménager, aux produits de l'informatique et de l'outillage, et sont issues des ménages et des activités économiques. Les petits électroménagers et petits outillages sont souvent conçus de manière à ce qu'ils soient quasiment impossible de les réparer (composants enrobés dans du silicone ou époxy) (Léonard, 2010). Cette manière de concevoir les rend obsolètes dès la première panne, provoquant un amoncellement de produits toxiques dans les décharges. Ce phénomène est d'autant plus accentué que l'industrie de l'électronique est l'une des plus grandes au niveau mondial (Li et al., 2013), et que le volume de D3E mis en décharge ne cesse d'augmenter (41.8 millions de tonnes en 2014 contre 33.8 millions en 2010, et une prévision de 49.8 millions de tonnes pour 2018 (Baldé et al., 2015; Tanskanen, 2013).

De par leur grand nombre, les D3E constituent un gisement de matières valorisables (métaux, terres rares, plastiques, verre), mais également de sous-ensembles pouvant servir de pièces détachées d'occasion. Malgré les nombreux avantages en termes économique, énergétique et environnemental qu'offre le réemploi des D3E, celui-ci est très peu développé. En 2015, 80% des D3E collectés et traités ont été valorisés sous forme de matières contre seulement 1% pour la réutilisation du produit et 1% pour ses sous-ensembles (ADEME, 2016) (Figure 4.52). Le réemploi au sein des D3E est donc très peu développé.

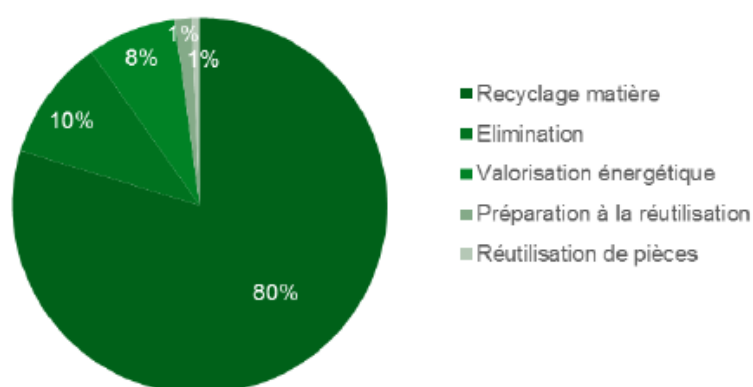


Figure 4.52 - Répartition des tonnages de D3E traités en 2015 par mode de traitement – Extrait de (ADEME, 2016)

Pour remédier à cette sous-exploitation, l'ADEME¹⁰ (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et GIFAM¹¹ (Groupement Interprofessionnel des Fabricants d'Appareils d'Équipement Ménager) ont demandé, en 2012 et en 2015, deux études sur la viabilité d'une filière de réemploi de produits d'électroménager et sur les conditions de réussite pour mettre en place cette filière (Rey-coquais, 2012). Ces études montrent qu'il **faut s'appuyer sur le réseau existant, notamment sur les entreprises de collectes de D3E**, qui ont une activité de diagnostic et de réparation de certains D3E. Parmi ces entreprises, nous pouvons citer le groupe PAPREC¹², ou encore le réseau ENVIE¹³ qui collectent un tiers des D3E produits en France par les particuliers. Ces entreprises s'attachent à réparer les D3E pouvant l'être en utilisant en priorité des pièces détachées d'occasion récupérées sur d'autres D3E. Parmi les entreprises de collectes de D3E, certains se focalisent sur plusieurs types de D3E, et d'autres sur un seul, tel que les téléphones portables, à l'image de l'entreprise REMADE qui les reconditionne à l'aide de pièces détachées issues d'autres téléphones non régénérés.

Pour des raisons de maintenabilité ou de réparabilité, nous nous focalisons sur les gros électroménagers, qui sont conçus pour être réparés, et plus particulièrement, sur les lave-linges.

Selon une étude TNS Sofres de 2013 pour le groupe GIFAM, près de 27 millions de ces appareils sont présents en France dans 96% des foyers, soit plus de 2.5 millions d'appareils vendus par an pour une durée moyenne d'utilisation de 10 ans et 11 mois. Parmi les lave-

¹⁰ <http://www.ademe.fr/>

¹¹ <http://www.gifam.fr/>

¹² <https://www.paprec.com/fr>

¹³ <http://www.envie.org/>

linges collectés pour valorisation matières, plus de 50% d'entre eux fonctionnent encore. Il serait intéressant de les utiliser comme lave-linges d'occasion ou comme pièces détachées.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter notre étude de cas, en définissant les différents éléments nécessaires à sa réalisation, tels que les données techniques de l'équipement étudié, et les exigences des parties prenantes considérées, tant sur le produit que sur les processus de régénération. Les objectifs principaux de ce chapitre sont de montrer l'intérêt de la régénération industrielle via une application des propositions des chapitres 2 et 3, et d'illustrer les capacités des Systems Dynamics à modéliser la régénération de produits_déchets au travers de différents scénarii.

Pour réaliser cette étude de cas, nous nous allons tester trois politiques de régénération : la première se focalise sur un flux poussé au niveau équipement, et sous-ensembles et composants ; la deuxième est réalisée dans un contexte de flux tiré en imposant aux fournisseurs un niveau d'état de santé du produit ; et la troisième reprend le contexte de flux tiré en relâchant les contraintes sur les processus de régénération. Une fois l'étude de cas présentée, nous modélisons chaque politique à l'aide des modèles génériques développés dans le chapitre 3, et les instancions en fonction de notre étude de cas. Finalement, la simulation et l'interprétation des résultats obtenus nous permettent de vérifier la viabilité des scénarios en termes environnemental et économique, et d'identifier celui qui est le plus intéressant et à quelles conditions.

II. Présentation de l'étude de cas

Notre étude de cas porte sur un lave-linge industriel (équipement de production produisant du linge propre) nouvellement acquis par une laverie automatique, dont nous allons observer l'évolution de l'état de santé au cours de ses cycles d'utilisation ainsi que les prises de décision de régénération. Nous faisons l'hypothèse que le lave-linge est maintenu de manière périodique par une entreprise spécialisée dans l'entretien des lave-linges.

1. Description de l'équipement étudié

Le lave-linge est un équipement permettant de réaliser un cycle de lavage, constitué de nombreux sous-ensembles et composants (Figure 4.53), ayant différentes fonctions (entraîner la rotation du tambour, brasser le linge, alimenter en eau la cuve, gérer les différentes fonctions, évacuer l'eau, etc.) permettant de réaliser un cycle de lavage. Un cycle de lavage se déroule en 5 étapes : le prélavage, le lavage, le rinçage, l'essorage et la vidange.

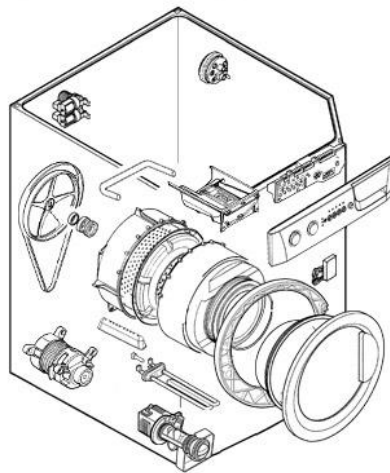


Figure 4.53 - Vue éclatée d'un lave-linge à ouverte frontale - Extrait du site Spareka¹⁴ de vente de pièces de rechanges et de conseil de réparation

1.1. Nomenclature du lave-linge et produits considérés

Les éléments constituant un lave-linge sont accessibles, indépendants, remplaçables, et peuvent être hiérarchisés selon leur typologie (Muckstadt, 1973) :

- LRU – Line Replaceable Unit : élément remplaçable rapidement, au cours de l'exploitation de l'équipement, par un autre élément équivalent,
- SRU – Shop Replaceable Unit : élément remplaçable, en atelier de maintenance, par un élément identique suite au dépôt du sur-niveau de l'élément,
- Non réparable.

La (Figure 4.54) présente les différents éléments, selon cette hiérarchisation, et nous avons choisi ceux les plus souvent mis en cause lors de pannes du lave-linge. Dans notre étude de cas, nous ne considérons que certains de ces éléments (en gris sur Figure 4.54) :

- le **lave-linge** : équipement considéré,
- l'**électrovanne** (remplissage de la cuve) : élément critique du lave-linge, notamment si elle est bloquée ouverte (remplissage constant de la cuve si le robinet d'arrivée d'eau est ouvert),
- la **bobine** de l'électrovanne : composant à l'origine des ouvertures ou fermetures intempestives de l'électrovanne,
- la **carte électronique de commande** (gestion des fonctions) : élément du lave-linge le plus souvent mis en cause lors d'une défaillance de celui-ci.

¹⁴ <http://www.spareka.fr/>

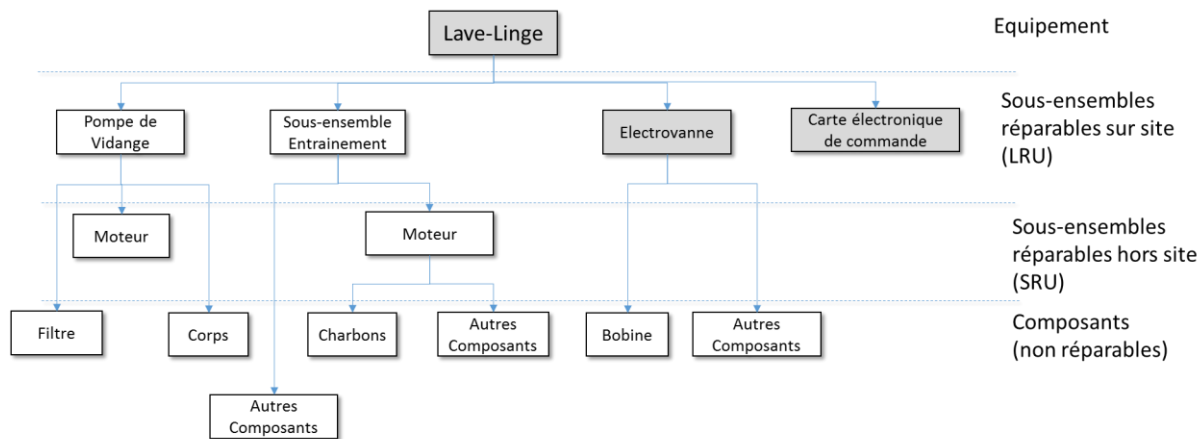


Figure 4.54 – Product breakdown structure simplifiée du lave-linge, répartition de ses constituants selon leur type

1.2. Données techniques sur les produits étudiés

Chaque élément étudié est, par la suite, défini selon les caractéristiques techniques : fiabilité, consommation énergétique et durée de remplissage de la cuve du lave-linge. Dans notre étude de cas, nous considérons que la fiabilité et la consommation énergétique sont une image de l'état de santé d'utilisation de l'équipement. Cependant, d'autres critères peuvent être utilisés pour représenter l'état de santé du lave-linge, tels que la qualité d'essorage, le niveau sonore, temps mis pour réaliser un cycle de lavage...

N'ayant pas encore à notre disposition de données quantitatives sur les sous-ensembles et les composants du lave-linge, nous utilisons des données fictives dans notre cas d'étude, mais se voulant réaliste. De plus, pour prendre en compte l'état de santé des équipements, et l'impact de la maintenance, nous choisissons de nous baser sur la connaissance de la fiabilité des produits pour caractériser en partie l'état de santé technique. Dans une application industrielle, on pourra compléter voire remplacer la fiabilité avec des indicateurs de dégradation spécifiques ou des durées de vie résiduelles (RUL produit, RUL composants, niveaux d'usure, ...).

1.2.1. Equipement - Lave-linge

Le lave-linge que nous considérons est un lave-linge professionnel fabriqué par une entreprise allemande, qui fournit de nombreuses entreprises et particuliers en gros électroménager.

Le modèle que nous avons retenu est prévu pour une utilisation intensive en laverie automatique, et peut être équipé d'un monnayeur (élément nécessaire lors d'une utilisation en laveries automatiques et en résidences étudiantes/locataires...). Ce modèle

de lave-linge a été testé sur une durée de fonctionnement équivalente à 30 000h. Pour simplifier les calculs, nous considérons qu'un cycle de lavage dure en moyenne 1h.

Tout produit est caractérisé, d'un point de vue fiabilité, par un temps de moyen avant défaillance (MTTF). Ce temps moyen nous permet de déterminer le taux de défaillance $\lambda(t)$ du lave-linge. L'évolution de ce taux de défaillance suit la forme d'une courbe en baignoire. En effet, le lave-linge est un équipement qui connaît 3 phases : jeunesse (rodage - taux de défaillance décroissant), constante (période de défaillances aléatoire) et vieillesse (usure - taux de défaillance croissant). Pour le lave-linge étudié, nous considérons le taux de défaillance $\lambda(t)$ donné par la (Figure 4.55). La date de fin de la période de rodage est fixée à 7 500h d'utilisation et la date début de la phase d'usure est fixée à 30 000h. Ces données sont fictives.

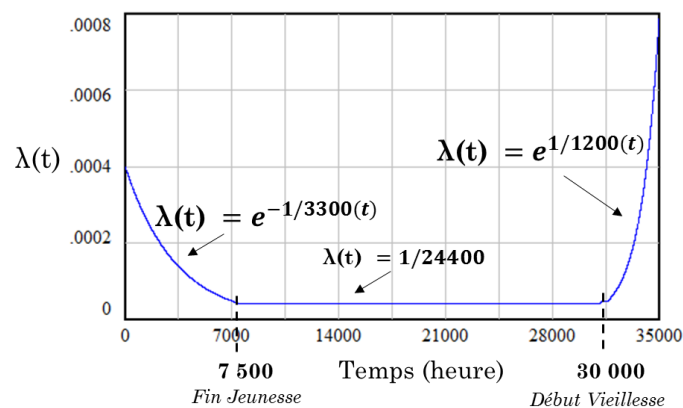


Figure 4.55 - Taux de défaillance du lave-linge étudié

La consommation énergétique, quant à elle, croît au cours du temps. Cet accroissement se fait de manière exponentielle en suivant un taux moyen d'accroissement que nous fixons à 4.10^{-4} kWh/lavage.

La fiabilité et la consommation d'un équipement sont liées à la fonction de structure de l'équipement, c'est-à-dire, la manière dont sont assemblés les sous-ensembles et composants entre eux (en série ou en parallèle).

Dans notre étude de cas, et pour des raisons de simplification, nous considérons que la fiabilité et la consommation énergétique de l'équipement sont dépendantes de celles de ses sous-ensembles. La fiabilité de l'équipement correspond à la fiabilité la plus basse parmi l'ensemble des sous-ensembles. Tandis que la consommation énergétique correspond à la somme des consommations énergétiques des sous-ensembles. Pour ce lave-linge, nous prenons comme valeurs de référence une fiabilité de 100% et une consommation énergétique de 0,58kWh/lavage.

1.2.2. Sous-ensembles – Electrovanne et Carte électronique de commande

Electrovanne

Les électrovannes considérées ont une fiabilité qui varie au cours du temps selon un taux de défaillance suivant une courbe en baignoire (Figure 4.56), et une consommation énergétique qui croît selon un taux de 2.10^{-7} kWh/lavage.

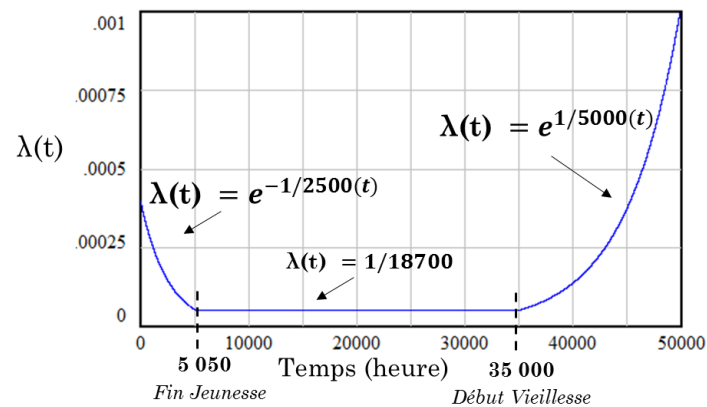


Figure 4.56 - Taux de défaillance de l'électrovanne étudiée

Pour ces électrovannes, nous prenons comme valeurs de référence une fiabilité de 100%, une consommation énergétique de 0,10kWh/lavage, et une durée de remplissage de la cuve de 200 secondes (débit du robinet d'arrivée d'eau de 12L/min et une cuve de 80L remplie de moitié).

Carte électronique de commande

La carte électronique de commande permet de gérer et traiter les données envoyées par les différents éléments du lave-linge, tout en les commandant.

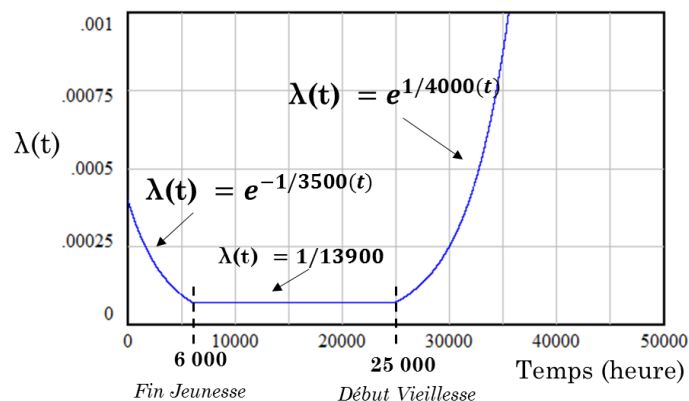


Figure 4.57 - Taux de défaillance de la carte électronique de commande étudiée

Les cartes électroniques de commande, que nous considérons, ont un taux de défaillance représenté par une courbe en baignoire (Figure 4.57), et un taux d'accroissement de la

consommation énergétique de $1.8.10^{-6}$ kWh/lavage. Pour ces cartes, nous prenons comme valeurs de référence une fiabilité à 100% et une consommation énergétique de 0,04kWh/lavage.

Afin d'instancier les diagrammes de stocks et flux développés au chapitre précédent et modéliser l'évolution des produits au sein des phases de vie et des régénérateurs, nous devons identifier les exigences de chaque partie prenante.

2. Expression des besoins et analyse des exigences des parties prenantes

Les parties prenantes que nous considérons sont celles qui ont un impact direct sur l'évolution et la vie du lave-linge, à savoir : Fournisseurs, Régénérateurs et Clients. Les exigences qu'elles imposent portent sur le produit et/ou sur les processus de régénération.

2.1. *Besoin et exigences sur le produit*

L'utilisation et la régénération du produit sont soumises au respect des exigences sur le produit, imposées par les parties prenantes. Pour savoir si un produit_déchet/nutriment respecte les besoins clients et régénérateurs, nous devons définir les exigences attendues par chaque partie prenante sur le produit.

2.1.1. En phase d'utilisation

Les clients intéressés par les fonctionnalités du lave-linge et de ces sous-ensembles/composants sont de tout type : usagers, mainteneurs, fabricants ou encore fournisseurs de service. Parmi ces fournisseurs et clients potentiels, notre étude de cas se focalise, pour le lave-linge, sur les **laveries automatiques**, les **résidences étudiantes** et les **restaurants**. Ces clients seront également fournisseurs de produits_déchets à différents cycles d'utilisation du produit.

Chacun des clients possède des exigences spécifiques, variant selon leurs activités, quant au produit_nutriment qu'il souhaite acquérir.

En termes d'équipements, les laveries et les résidences étudiantes offrent le même service (mise à disposition de lave-linges pour des particuliers moyennant finance), et ont des exigences proches. Ils achètent donc le même type de lave-linge. Les restaurants ont des besoins moins contraignants qui ne nécessitent pas un lave-linge aussi performant que celui des deux clients précédents. Le prix moyen du lave-linge neuf, répondant à leurs besoins respectifs, pour une laverie est de 5 600€, de 5 300€ pour une résidence, et de 2 000€ pour un restaurant (ces prix sont issus de sites de vente de lave-linges professionnels et correspondent aux modèles répondant aux exigences minimum des clients).

Outre ces exigences liées au coût d'acquisition d'un lave-linge, ces clients se fixent une durée d'utilisation maximale de leur lave-linge. Cette durée dépend notamment de la durée d'amortissement et est donnée par le Tableau 4.6 pour les lave-linges neufs et les lave-linges régénérés.

Tableau 4.6 - Durées maximales d'utilisation fixées par les clients pour des lave-linges neufs et régénérés

		Laverie	Résidence étudiante	Restaurant
Durée d'utilisation max (an)	Lave-linge neuf	6,5	11,5	12
	Lave-linge régénéré	5	9	7

Les exigences clients considérées pour un produit_nutriment (produit régénéré) se rapportent à l'état de santé (matérialisé par sa classe) et au prix d'achat du produit_nutriment souhaité. Les régénérateurs associent une fourchette de prix de vente pour chaque classe en fonction du prix neuf (PN) du produit_nutriment. Ainsi pour un produit_nutriment vendu de classe A, le prix d'achat est compris entre $[PN ; PN-15\%PN]$, de classe B entre $[PN-16\%PN ; PN-35\%PN]$ et de classe C entre $[PN-36\%PN ; PN-60\%]$. La variation entre le prix min et max est liée au niveau de satisfaction de l'aspect physique et de l'état technique.

Pour rappel, chaque produit_nutriment est mis en vente selon une classe, dépendante de l'aspect physique et de l'état technique du produit (Tableau 4.7).

Tableau 4.7 - Identification de la classe de l'état de santé en fonction de l'aspect physique et l'état technique

		Classe Etat Technique		
		A	B	C
Classe Aspect Physique	A	A	B	C
	B	A	B	C
	C	B	B	C

Par exemple, la résidence étudiante souhaite acquérir un lave-linge_nutriment de classe B. Le lave-linge que nous considérons coûte 5 600€ neuf. Ainsi, la résidence devra dépenser entre 4760 € et 3 640€ pour acquérir un lave-linge_nutriment. Le (Tableau 4.8) résume les prix considérés en fonction de la classe du lave-linge_nutriment.

Tableau 4.8 – Fourchette de prix de vente du lave-linge_nutriment selon la classe satisfaite

	Classe			
	Neuf	A	B	C
Prix en € [Max ; Min]	5600	[5 600 ; 4 760]	[4759 ; 3640]	[3639 ; 2240]

2.1.2. En phase de régénération

Les régénérateurs permettent aux lave-linges_déchets d'accroître leur durée de vie, ainsi que celles de leurs sous-ensembles et composants. Parmi les régénérateurs présentés dans le « Chapitre 2 », nous ne considérons pas la détechnification car nous faisons l'hypothèse de garder les produits dans la sphère technique afin de limiter les extractions de matières au sein de la sphère naturelle.

De manière générale, les régénérateurs fixent des exigences sur le produit_déchet (équipements, sous-ensembles et composants) afin d'être certains de pouvoir le revendre. Deux options s'offrent aux régénérateurs, soient ils régénèrent des produits_déchets appartenant au minimum à la classe la plus basse de leur classification, soient ils régénèrent des produits_déchets appartenant à la classe la plus basse, moins les capacités de remise en état minimum de l'activité de remise en état (ex : seuil de fiabilité minimum accepté pour un produit_déchet de classe C et une capacité de récupération de fiabilité de 5% : $91\% - 5\% = 86\%$). Dans notre étude de cas, le régénérateur n'accepte de régénérer que les produits_déchets appartenant au minimum à la classe C.

2.1.2.1. Diagnostic de Décomposition

Le diagnostic de décomposition se focalise sur les exigences de régénération. Au niveau du processus de déconnexion, le lave-linge_déchet entrant arrive déjà déconnecté de son environnement, le régénérateur ne peut que diagnostiquer son état de santé d'utilisation. De plus, au niveau du processus de désassemblage, le lave-linge_déchet est désassemblé, car nous faisons l'hypothèse qu'un équipement est obligatoirement désassemblé afin de récupérer ses constituants. L'activité de diagnostic de décomposition n'étant pas sollicité dans notre étude de cas, les exigences de régénération ne sont, donc, pas développées.

2.1.2.2. Diagnostic de Remise en état

Le diagnostic de remise en état se focalise sur les exigences d'utilisation. Parmi les exigences d'utilisation, nous nous intéressons à celles portant sur l'état de santé d'utilisation, c'est-à-dire, les exigences d'aspect physique et d'état technique.

La démarche étant la même pour chaque niveau du produit et chaque régénérateur, nous ne développons que les exigences du lave-linge_déchet associées au déconnecteur.

Diagnostic d'Aspect physique

Afin d'effectuer le diagnostic de l'aspect physique, le régénérateur exprime des exigences sur les 4 critères suivants : la présence des connectiques, les taux de rouille, de bosses et de rayures (Tableau 4.9).

Tableau 4.9 – Exemples d'exigences d'utilisation d'aspect physique du lave-linge_déchet pour le régénérateur déconnexion

Références exigences		Exigences
EProdUPRD1		Le lave-linge_déchet doit avoir toutes ses connectiques de liaison à son environnement (alimentation électrique, alimentation en eau).
EProdUPRD2		Le lave-linge_déchet doit avoir un aspect physique correspondant au minimum à la classe C.
	EProdUPRD2.1	Le lave-linge_déchet doit avoir un taux de rouille inférieur à 10%.
	EProdUPRD2.2	Le lave-linge_déchet doit avoir un taux de bosses inférieur à 15%.
	EProdUPRD2.3	Le lave-linge_déchet doit avoir un taux de rayures inférieur à 20%.

Les valeurs associées aux variables des exigences sont susceptibles de changer en fonction de la classe de produits_déchets que le régénérateur souhaite régénérer. Les valeurs de classes portant sur l'aspect physique sont présentées dans (Tableau 4.10).

Tableau 4.10 - Seuils de classification de l'aspect physique pour le lave-linge_déchet au sein du déconnecteur

	Aspect physique			
	Fils non sectionnés	Présence rouille (en %)	Présence bosses (en %)	Présence rayures (en %)
Classe A	1 (oui)	2	3	4
Classe B	1 (oui)	5	8	10
Classe C	1 (oui)	10	15	20

Diagnostic Technique

Le régénérateur établit des exigences d'utilisation sur l'état technique du produit_déchet. Celles retenues portent les 4 critères suivants : la fonctionnalité, la fiabilité, la consommation énergétique et la durée de remplissage de la cuve (Tableau 4.11).

Tableau 4.11 - Exemples d'exigences d'utilisation d'état technique du lave-linge_déchet pour le régénérateur déconnexion

Références exigences		Exigences
EProdUTRD1		Le lave-linge_déchet doit être fonctionnel.
EProdUTRD2		Le lave-linge_déchet doit avoir un état technique correspondant au minimum à la classe C.
	EProdUTRD2.1	Le lave-linge_déchet doit avoir une fiabilité supérieure ou égale à 91%.
	EProdUTRD2.2	Le lave-linge_déchet doit consommer au plus 0.66 kWh/lavage.
	EProdUTRD2.3	Le lave-linge_déchet doit se remplir en maximum 300 secondes.

Les valeurs associées aux variables des exigences sont susceptibles de changer en fonction de la classe de produits_déchets que le régénérateur souhaite régénérer. Les valeurs de classes portant sur l'état technique sont données dans (Tableau 4.12).

Tableau 4.12 – Seuils de classification de l'état technique pour le lave-linge au sein du déconnecteur

	Etat technique			
	Fonctionnalité	Fiabilité x100 (en %)	Consommation Énergétique (en kWh/lavage)	Durée de remplissage max (en secondes)
Classe A	1 (oui)	98	0.61	230
Classe B	1 (oui)	95	0.63	260
Classe C	1 (oui)	91	0.66	300

Les (Tableau 4.10) et (Tableau 4.12) permettent aux régénérateurs de connaître les différentes actions qu'ils doivent faire pour atteindre une classe donnée de lave-linge_nutriment.

2.2. Besoin et exigences sur les processus de régénération

Dans cette section, nous nous focalisons sur les exigences qui sont spécifiquement associées aux régénérateurs, et qui permettent de passer d'une activité à une autre en vue de régénérer le produit_déchet. Nous faisons l'hypothèse que toutes les exigences processus sont satisfaites, exceptée celle portant sur le temps mis pour réaliser chaque activité, et donc les coûts engendrés par chacune d'entre elles.

2.2.1. Exigences économiques processus

Le régénérateur fixe des exigences économiques processus à chacune des activités de régénération afin que la marge qu'il souhaite réaliser soit respectée. Un exemple de ces exigences est donné dans (Tableau 4.13).

Tableau 4.13 – Exemples d'exigences économiques processus des régénérateurs

Références exigences			Exigences
EProcEcoN1			La marge réalisée sur la vente du lave-linge_nutriment doit être supérieure à 40% du prix de vente.
	EProcEcoD1		Le coût de régénération du lave-linge_déchet doit être inférieur à 60% du prix du lave-linge_nutriment.
		EProcEcoD1.1	Le coût de diagnostic du lave-linge_déchet doit être inférieur à 15% du prix de la régénération.
		EProcEcoD1.2	Le coût de décomposition du lave-linge_déchet doit être inférieur à 30% du prix de la régénération.
		EProcEcoD1.3	Le coût de remise en état du lave-linge_déchet doit être inférieur à 45% du prix de la régénération.

		EProcEcoD1.4	Le coût de requalification du lave-linge_déchet doit être inférieur 10% du prix de la régénération.
--	--	--------------	---

2.2.2. Exigences technique processus

Les exigences techniques processus portent sur les activités de décomposition et de remise en état. Les activités de décomposition du lave-linge_déchet n'étant pas réalisées par le déconnecteur, nous nous focalisons uniquement sur celles de la remise en état. En effet, nous considérons que les lave-linges_déchets sont déconnectés de leur environnement par les fournisseurs.

Remise en état

La remise en état d'un produit_déchet est conditionnée par le résultat obtenu durant diagnostic de remise en état, par l'écart existant entre la classe d'entrée et celle de sortie, et par le fait de choisir une amélioration ou un maintien de classe, ou une transformation du produit_déchet en pièce détachée.

La régénération impliquant la vente des produits_nutriments, ceux-ci ne doivent pas seulement être réparés, ils doivent également être nettoyés, puis reconditionnés pour la vente.

La réparation se base principalement sur le remplacement ou la remise en état d'un élément défectueux, mais aussi sur de la prévention. Par exemple :

- Au niveau du lave-linge, la remise en état peut consister au changement des tuyaux d'alimentation en eau et/ou des filtres, même si ceux-ci ne sont ni bouchés, ni percés.
- Sur le moteur du lave-linge, il est possible de changer les charbons qui risquent d'engendrer l'arrêt de la rotation du moteur (pour non circulation du courant).
- Des vis, écrous, boulons peuvent également être remplacés, de même que le joint de la porte permettant l'accès au tambour.
- De la matière première non secondaire peut être ajoutée à la secondaire pour remettre ses performances à niveau (ex : dans le cas du papier, les fibres de bois se raccourcissent au fur et à mesure des recyclages, faisant perdre en qualité les papiers fabriqués. Il est donc nécessaire d'ajouter des fibres de bois vierges à celles recyclées pour conserver une qualité de papier satisfaisante)¹⁵.

¹⁵ <https://www.paprec.com/fr/comprendre-recyclage/recyclage-papiers-cartons/fabrication-pate-a-papier>

Le nettoyage consiste, entre autres, aux faits de :

- enlever la crasse, les moisissures,
- enlever la rouille qui a pu se déposer sur la carcasse du lave-linge ou de ses sous-ensembles,
- remettre en peinture pour amoindrir les rayures, la rouille, appliquer des traitements chimiques...,
- redresser des éléments tordus (bosse sur la carcasse du lave-linge, axe moteur tordu...),
- enlever les impuretés (lavage, frottement, aimantation, chauffe...),
- ...

Le reconditionnement consiste à apprêter le produit_nutriment pour qu'il puisse être mis en vente de la même manière que s'il était neuf, par exemple :

- mettre des bouchons sur les tuyaux d'alimentation en eau afin qu'ils ne se bouchent pas,
- enrouler les tuyaux et les câbles afin qu'ils ne dépassent pas du produit,
- le protéger pour le transport (emballages carton, protections polystyrène...)
- apposer un certificat de conformité,
- le mettre sous forme de ballots, granulés...,
- ...

Ces différentes actions permettent de déduire les capacités de remise en état du régénérateur (Tableau 4.14). Ces capacités et la classe visée par le régénérateur permettent de déduire les valeurs associées aux exigences d'utilisation servant aux diagnostics, et par conséquent, de déduire la classe minimum du produit_déchet à régénérer. Par exemple, le régénérateur souhaite produire un lave-linge_nutriment de classe B. En se focalisant uniquement sur l'aspect physique, celui du produit_déchet doit être au minimum de classe C, c'est-à-dire, que le taux de rouille doit être inférieur ou égale à 10%. Le régénérateur a la possibilité de retirer jusqu'à 4% de rouille sur le lave-linge_déchet. La combinaison classe C et 4% de rouille retirable permet au régénérateur de fixer une exigence d'utilisation sur le produit_déchet. L'exigence obtenue est donc : le lave-linge_déchet doit avoir un taux de rouille inférieur à 14% (10% (classe C)-4% (capacité)).

Tableau 4.14 - Capacités de remise en état du lave-linge par le déconnecteur

	Aspect physique	Etat technique
Taux de rouille max retirable (en %)	4	-
Taux de bosses max retirable (en %)	3	-
Taux de rayures max retirable (en %)	6	-
Taux de fiabilité max récupérable (en %)	-	5
Consommation énergétique max récupérable (en kWh/lavage)	-	0.035
Durée de remplissage max récupérable (en s)	-	300

Concernant l'état technique, nous faisons l'hypothèse que lorsque le changement de classe (A vers B, B vers C, C vers hors classe) est dû à la durée de remplissage du lave-linge, l'électrovanne est obligatoirement remplacée par une électrovanne neuve, ou appartenant, au minimum, à la classe visée.

Afin de réaliser l'ensemble des actions de remise en état, le régénérateur fixe des exigences processus quant aux outils nécessaires et ses capacités de remise en état (Tableau 4.15).

Tableau 4.15 – Exemples d'exigences techniques processus régénérateurs

Références exigences	Exigences
EProcTR1	Les outils pour remettre le lave-linge_déchet doivent être disponibles.
EProcTR2	La remise en état du lave-linge_déchet doit permettre d'enlever jusqu'à 4% de rouille.
EProcTR3	La remise en état du lave-linge_déchet doit permettre d'enlever jusqu'à 3% de bosses.
EProcTR4	La remise en état du lave-linge_déchet doit permettre d'enlever jusqu'à 6% de rayures.
EProcTR5	La remise en état du lave-linge_déchet doit permettre d'augmenter la fiabilité de 5%.
EProcTR6	La remise en état du lave-linge_déchet doit permettre de réduire la consommation énergétique 0.035kWh.
EProcTR7	La remise en état du lave-linge_déchet doit permettre de remplacer les électrovannes défectueuses.

Les exigences des parties prenantes directement impliquées dans la régénération étant définies, nous nous intéressons aux différentes politiques de régénération, s'appuyant sur les deux visions des flux (poussé ou tiré) développées dans le chapitre 2. Ces politiques sont par la suite modélisées au travers des diagrammes stocks et flux, modélisés au chapitre 3, et évaluées par simulation afin de visualiser leur impact sur la régénération.

3. Politiques de régénération

Pour montrer les possibilités de l'outil d'aide à la décision, nous nous plaçons dans le cas où une société de régénération de lave-linges doit choisir une politique de régénération :

- Politique 1 : la société se place dans le cas du flux poussé où elle n'a aucune influence sur l'état de santé du lave-linge_déchet reçu. Cette politique sera étudiée à 2 niveaux de granularité : l'un au niveau du lave-linge (scénario 1) et l'autre au niveau lave-linge et sous-ensembles (scénario 2).
- Politique 2 : La société se place dans le cas d'un flux tiré où elle impose, à ces fournisseurs de lave-linges, un état de santé matérialisé par un niveau de fiabilité et une fréquence d'actions de maintenance lors de l'utilisation (scénario 3). De plus, elle se fixe une marge de 500€ par lave-linge_nutriment. Les fournisseurs se fixent un temps minimum d'utilisation avant mis en régénération afin de garantir la rentabilité de leur achat.
- Politique 3 : la société veut augmenter le nombre de classe A de produits_nutriments vendus par rapport à celui de la politique 2. Pour cela, elle identifie les paramètres influençant cette augmentation, et les ajuste en conséquence.

Les conditions d'évolution de ces politiques varient selon le flux dans lequel elles se placent, et sont détaillées dans la suite.

3.1. Condition d'évolution de la régénération dans le cas du flux poussé – politique 1

Dans le flux poussé, les régénérateurs ne maîtrisant pas les flux de lave-linges_déchets, chaque utilisateur (laverie automatique, résidence étudiante, restaurant) exploite le lave-linge pendant une durée qu'il fixe. Cette durée révolue, l'utilisateur se sépare du lave-linge, qui est alors récupéré par le déconnecteur dans les déchetteries.

Au sein du processus de déconnexion, le lave-linge suit les activités du diagnostic de remise en état, de la remise en état et de la requalification avant d'être ré-employé, le cas échéant, par un autre utilisateur.

La succession des clients dépend de la caractérisation de l'état de santé du lave-linge au moment de la requalification. Dans le cas, où un produit_nutriment satisfait plusieurs clients, nous faisons l'hypothèse de privilégier les clients qui demandent la classe la plus élevée, c'est-à-dire, de satisfaire la laverie, puis la résidence et finalement le restaurant. En effet, on peut faire l'hypothèse que le prix de vente sera fonction de la classe d'appartenance

La fenêtre d'observation du lave-linge s'arrête dès l'instant qu'il est envoyé en désassemblage, c'est à dire qu'on passe à la valorisation de ses constituants.

Le scénario 2 a la même évolution que celle explicitée ci-dessus, mais le comportement des variables d'exigences sur l'état technique du lave-linge dépendent du comportement de celles de ses sous-ensembles.

Nous estimons que les sous-ensembles peuvent être défaillants lors de la phase d'utilisation du lave-linge. L'instant de défaillance est défini pour chaque sous-ensemble selon un intervalle de temps. Les bornes de ces défaillances sont :

- Pour l'électrovanne : $t = [15\ 500h ; 20\ 000h]$,
- Pour la carte électronique : $t = [17\ 000h ; 19\ 000h]$.

Dès qu'un sous-ensemble est défaillant, celui-ci est aussitôt remplacé par un équivalent neuf.

Lors de la 1^{ère} utilisation du lave-linge, nous faisons l'hypothèse que celui-ci ne connaît aucune défaillance, car il est neuf et que sa durée d'utilisation ne dépasse pas 15 000h (moitié de la durée testée par le fabricant du lave-linge).

Le scénario 2 sera notre point de comparaison avec le scénario 3, et nous permet de déterminer si le passage d'un flux poussé à un flux tiré est intéressant pour les utilisateurs et/ou les régénérateurs, c'est-à-dire que le nombre de cycles d'utilisation augmente, que le nombre de produits_nutriments par classes augmente, ...

3.2. Condition d'évolution de la régénération dans le cas du flux tiré – politiques 2 et 3

La politique 2 et la politique 3 s'appuient sur le scénario 2 de la politique 1 en imposant des exigences d'utilisation aux fournisseurs :

- Les fournisseurs doivent mettre en place des maintenances périodiques afin de faciliter la régénération des lave-linges_déchets.
- Le niveau de fiabilité du lave-linge_déchet doit être supérieur ou égale à 96% au moment de la vente du lave-linge_déchet auprès des régénérateurs de déconnexion.

La 1^{ère} exigence se traduit, chez les fournisseurs, par des maintenances périodiques réalisées tous les 3 mois pour la laverie, 6 mois pour la résidence et 10 mois pour le restaurant. Ces maintenances permettent une hausse de 1.5% des valeurs des variables d'exigences de l'état technique. Par exemple, une maintenance périodique sur une fiabilité de 90% la fait passer à 91.35%. Cette valeur est choisie arbitrairement, mais reste relativement pessimiste.

La 2^{ème} exigence se traduit par un arrêt de l'exploitation du lave-linge quand la fiabilité arrive à 96%. Toutefois, les fournisseurs, souhaitant rentabiliser leur achat, n'acceptent de vendre le lave-linge qu'après une durée minimum d'exploitation. Les durées retenues sont 8 500h pour la laverie, 11 000h pour la résidence étudiante et 1 500h pour le restaurant. Tant que cette durée n'est pas atteinte, le fournisseur s'engage à maintenir le lave-linge en vue de sa régénération future.

La politique 3 reprend et s'appuie sur les résultats obtenus dans le scénario 3 pour augmenter le nombre de lave-linges_nutriments de classe A. Cette augmentation doit être d'au minimum 5 lave-linges, plus 10% par rapport au nombre obtenu lors du scénario 3. Pour cela, la régénération doit identifier les paramètres influençant la classe d'un produit_nutriment. Les paramètres modifiables ne peuvent porter que sur les exigences imposées aux fournisseurs, aux exigences processus, et aux exigences économiques d'utilisation du régénérateur. Une fois, la ou les variables identifiées, le régénérateur les ajuste jusqu'à obtenir le résultat souhaité. Ensuite, il doit déterminer si son exigence de classe sortante est réaliste ou non.

En se basant sur les modèles développés dans le chapitre 3 et la description de l'étude de cas, nous instancions les modèles, puis les simulons pour observer les critères portant sur la différence entre classe entrante et classe sortante, le nombre de lave-linges_nutriments produits, le nombre de cycles d'utilisation parcourus par un lave-linge, et la durée de vie moyenne d'un lave-linge.

III. Evaluation des politiques de régénération

Dans cette partie, nous modélisons et instancions le comportement du produit au travers des phases d'utilisation et de régénération et selon les exigences produit et processus.

Parmi les logiciels dédiés à la modélisation et simulation des System Dynamics (Vensim¹⁶, Stella and iThink¹⁷, PowerSim¹⁸, Anylogic¹⁹...), nous avons retenu le logiciel « VenSim » - version Professionnelle.

Les modèles présentés ci-dessous sont les mêmes pour toutes les politiques. Si une différence apparaît entre les scénarios, celle-ci est indiquée.

¹⁶ www.vensim.com

¹⁷ www.iseesystems.com

¹⁸ www.powersim.com

¹⁹ www.anylogic.com

1. Modélisation du comportement du lave-linge

Dans un premier temps, nous proposons de nous intéresser à la modélisation du comportement du lave-linge au travers des phases de vie qu'il traverse et de l'évolution de son état de santé.

1.1. Evolution du produit dans les phases de vie

Dans cette étude de cas, nous nous focalisons sur les phases d'utilisation et de régénération par le déconnecteur.

1.1.1. Passage d'une phase de vie à une autre

Les phases de vie traversées par le lave-linge sont modélisées à l'aide d'une variable stock « *WM LifeCyclePhase* » (WM : Washing Machine) (Figure 4.58, où Regen = Regeneration) (Équation 3.1), initialisé à 1 (en utilisation) qui s'incrémente lorsque le lave-linge passe par la déconnexion ou le désassemblage (Équation 4.28, où Disc = Disconnection et Disass = Disassembly), et se décrémente dès que la régénération est terminée et que le lave-linge passe de nouveau en utilisation (lave-linge vendu) (« *WM SaleDiscOk* ») (Équation 4.29).

Dans notre étude, nous souhaitons connaître le régénérateur dans lequel se trouve le lave-linge. Ainsi, *WM LifeCyclePhase* = 1 signifie que le lave-linge est en cours d'utilisation, = 2 signifie que le lave-linge est en déconnexion, et = 3 signifie qu'il est en désassemblage.

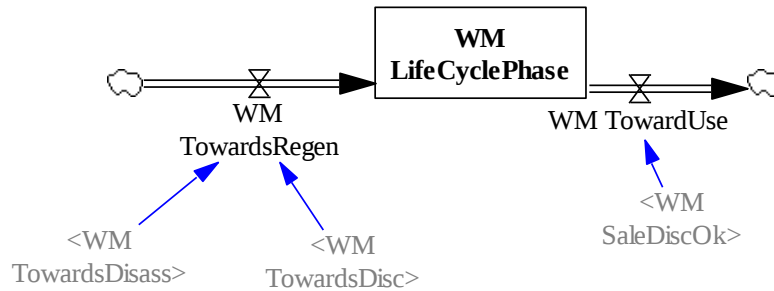


Figure 4.58 - Modélisation de la phase du cycle de vie parcourue par le lave-linge (Cas du scénario 1)

Équation 4.27

$$WM LifeCyclePhase = WM TowardsRegen - WM TowardsUse$$

Équation 4.28

$$WM TowardsRegen = \begin{cases} 1, & WM TowardsDisc = 1 \text{ ou } WM TowardsDisass \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 4.29

$$WM TowardsUse = \begin{cases} 1, & WM SaleDiscOk = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

1.1.2. Activités de régénération

Dans notre étude de cas, le processus de déconnexion ne réalise pas l'activité de décomposition, il se focalise directement sur la remise en état du lave-linge_déchet, en réalisant au préalable une activité de diagnostic. Dans cette section, les différentes activités du processus de régénération sont présentées activité par activité, et sont représentées par différentes couleurs, afin de mieux les identifier. Ainsi sur les Figure 4.59 à 4.61, l'activité de diagnostic de remise en état est représentée en orange, celle de remise en état en bleu ciel, et celle de la requalification en rose. Les variables noires représentent les variables qui permettent d'entrer ou de sortir du régénérateur. Le modèle complet est donné en (Annexes – Chapitre 4 – I.).

Diagnostic de remise en état

Ce premier modèle (Figure 4.59) permet de déterminer si le lave-linge_déchet peut être régénéré ou non par le déconnecteur.

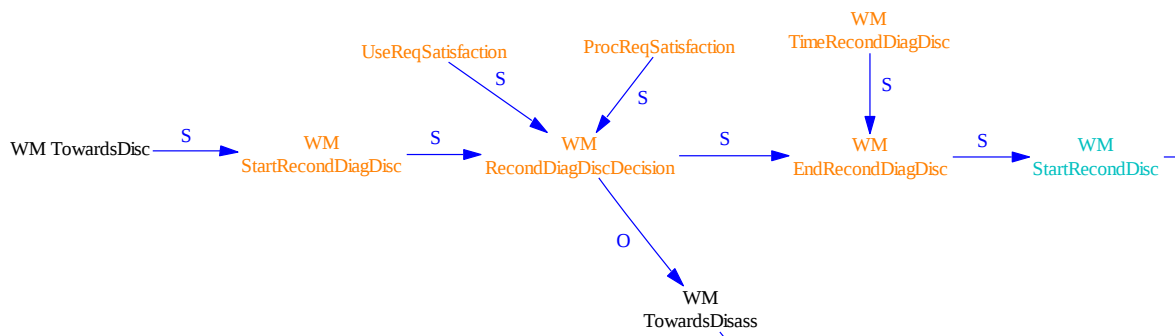


Figure 4.59 - Modélisation de l'activité de diagnostic de remise en état du déconnecteur

Le diagnostic se déclenche (« *WM StartRecondDisc* » avec *Recond* = Recondition) au moment où le lave-linge entre en déconnexion (« *WM TowardsDisc* ») (Équation 4.30).

Équation 4.30

$$StartRecondDisc = \begin{cases} 1, & WM\ TowardsDisc = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

S'en suit une prise de décision (« *WM RecondDiscDecision* ») (Équation 4.31) quant au fait de remettre en état (*WM RecondDiscDecision* = 1) ou non (*WM RecondDiscDecision* = 2) le lave-linge_déchet. Cette décision dépend de la satisfaction des exigences d'utilisation (*WM UseReqSatisfaction* = 1) et processus (*WM ProcReqSatisfaction* = 1, avec *Proc* = Processus et *Req* = Requirement).

Équation 4.31

$$WM\ RecondDiscDecision = \begin{cases} 1, & \text{StartRecondDisc} = 1 \text{ et} \\ & UseReqSatisfaction = 1 \text{ et ProcReqSatisfaction} = 1 \\ 2, & \text{StartRecondDisc} = 1 \text{ et} \\ & (UseReqSatisfaction = 0 \text{ ou ProcReqSatisfaction} = 0) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Où } UseReqSatisfaction = \begin{cases} 1, & UseHealthState = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Et } ProcReqSatisfaction = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n ProcReq_i = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Si le lave-linge_déchet peut être remis en état, le diagnostic de remise en état se termine (« *WM EndRecondDisc* ») après que la durée de diagnostic (« *WM TimeRecondDisc* ») soit écoulée (Équation 4.32).

Équation 4.32

$$WM\ EndRecondDisc = \begin{cases} 1, & WM\ RecondDiscDecision = 1 \text{ et} \\ & DELAY(WM\ RecondDiscDecision, WM\ TimeRecondDisc, WM\ RecondDiscDecision) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Si le lave-linge_déchet ne peut être remis en état par la déconnexion, il est envoyé vers un autre régénérateur (« *WM TowardsDisass* ») (Équation 4.33).

Équation 4.33

$$WM\ TowardsDisass = \begin{cases} 1, & WM\ RecondDiscDecision = 2 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Remise en état

Une fois, la décision de remise en état prise, l'activité de remise en état commence (« *WM StartRecondDisc* ») (Figure 4.60) (Équation 4.34).

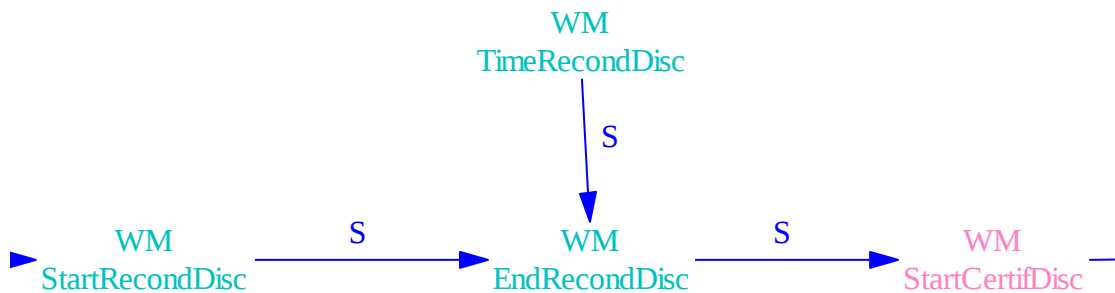


Figure 4.60 - Modélisation de l'activité de remise en état du lave-linge au sein du déconnecteur

Équation 4.34

$$WM\ StartRecondDisc = \begin{cases} 1, & WM\ EndRecondDisc = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La remise en état est réalisée selon une durée (« *WM TimeRecondDisc* ») calculée en fonction des durées estimées par le régénérateur pour chaque variable d'exigences d'utilisation pour faire passer le lave-linge_déchet de la classe d'entrée diagnostiquée à celle de sortie souhaitée par la déconnexion (Équation 4.35).

Équation 4.35

$$\begin{aligned} WM\ TimeRecondDisc \\ = & WM\ TimeRecondDiscRusty + WM\ TimeRecondDiscScratched \\ & + WM\ TimeRecondDiscDented + WM\ TimeRecondDiscTechState \end{aligned}$$

Cette durée écoulée et la remise en état validée (« *WM EndRecondDisc* ») (Équation 4.36), et le lave-linge_nutriment est orienté vers la requalification (« *WM StartCertifDisc* », avec Certif = Certification) (Figure 4.61) (Équation 4.37).

Équation 4.36

$$\begin{aligned} WM\ EndRecondDisc \\ = & \begin{cases} 1, & WM\ StarRecondDisc = 1 \text{ et} \\ DELAY(WM\ StartRecondDisc, WM\ TimeRecondDisc, WM\ StartRecondDisc) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

Requalification

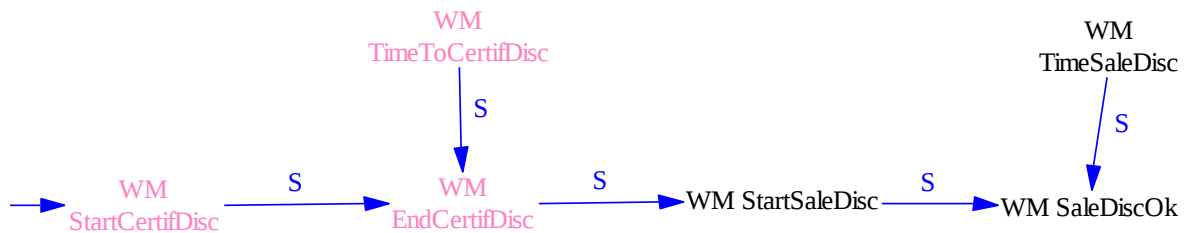


Figure 4.61 - Modélisation de l'activité de requalification du lave-linge au sein du déconnecteur

Équation 4.37

$$WM\ StartCertifDisc = \begin{cases} 1, & WM\ EndRecondDisc = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Lors de l'activité de requalification, la classe du lave-linge_nutriment est déterminée selon le modèle de (Figure 4.62) et se basent sur les Tableau 4.10 et Tableau 4.12.

Nous donnons uniquement l'exemple sur la classe d'aspect physique et la variable « *WM RustyBody* », mais la même démarche est appliquée sur l'ensemble des variables et sur l'état technique.

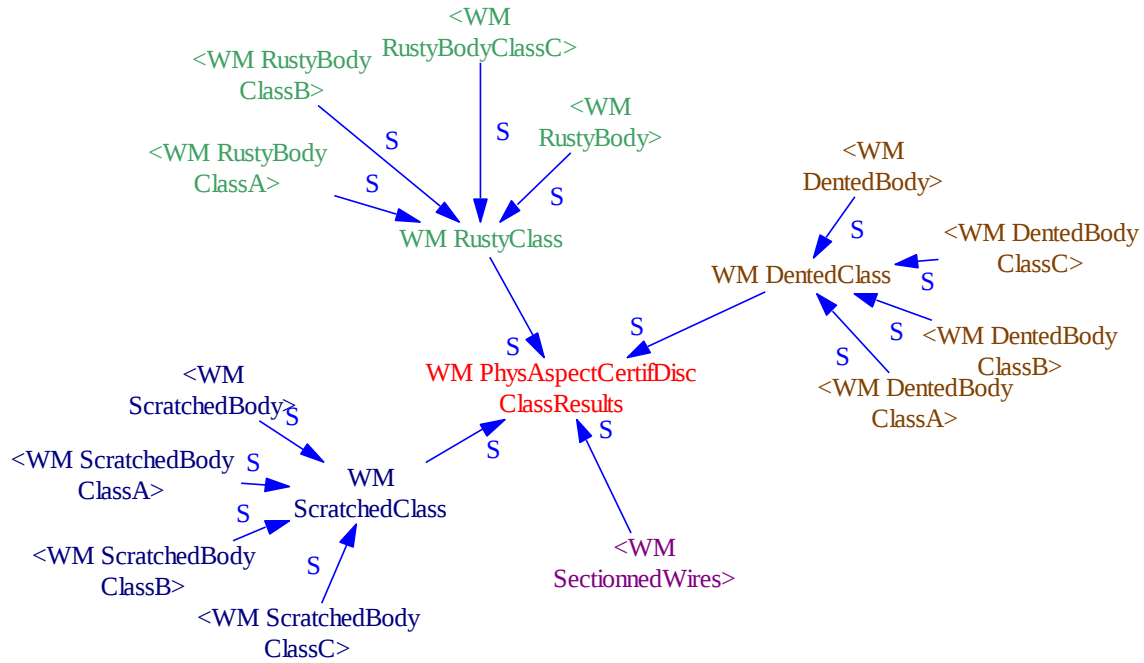


Figure 4.62 – Agrégat de variables permettant la caractérisation de l'aspect physique du lave-linge_nutriment

Pour caractériser la classe de la variable « *WM RustyBody* » (variables vertes), le régénérateur compare la valeur de la variable du lave-linge_nutriment avec celles des seuils de classe (Équation 4.38).

Équation 4.38

$$WM\ RustyClass = \begin{cases} 1, & WM\ RustyBodyClassA \geq WM\ RustyBody \\ 2, & WM\ RustyBodyClassA < WM\ RustyBody \leq WM\ RustyBodyClassB \\ 3, & WM\ RustyBodyClassB < WM\ RustyBody \leq WM\ RustyBodyClassC \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Où, $WM\ RustyBodyClassA = 2\%$, $WM\ RustyBodyClassB = 5\%$, et $WM\ RustyBodyClassC = 10\%$

Une fois les classes de toutes les variables identifiées, l'aspect physique est caractérisé selon (Équation 4.39, où PhysAspect = Physical Aspect). Par exemple, pour être classé A, le lave-linge_nutriment doit avoir toutes ses variables classées A, et avoir toutes ses connectiques présentes (« *WM SectionnedWires* », variable violette). Si les classes des variables sont différentes, la classe finale correspond à la classe la plus faible. Par exemple, si la rouille est classée C alors que celles de bosses (« *WM DentedClass* »,

variables marron) et celles de rayures (« *WM ScratchedClass* », variables bleues) sont classées B, l'aspect physique du lave-linge_nutriment est classé C.

Équation 4.39

$$WM PhysAspectCertifDiscClassResults = \begin{cases} 1, & WM RustyClass = 1 \text{ et } WM ScratchedClass = 1 \\ & \text{et } WM DentedClass = 1 \text{ et } WM SectionnedWires = 0 \\ 2, & (WM RustyClass = 2 \text{ ou } WM ScratchedClass = 2 \\ & \text{ou } WM DentedClass = 2) \text{ et } WM SectionnedWires = 0 \\ 3, & (WM RustyClass = 3 \text{ ou } WM ScratchedClass = 3 \\ & \text{ou } WM DentedClass = 3) \text{ et } WM SectionnedWires = 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Grâce aux estimations des classes de l'aspect physique et de l'état technique, le régénérateur peut caractériser l'état de santé d'utilisation du lave-linge_nutriment (Figure 4.63) (Équation 4.40) en se basant sur Tableau 4.7.

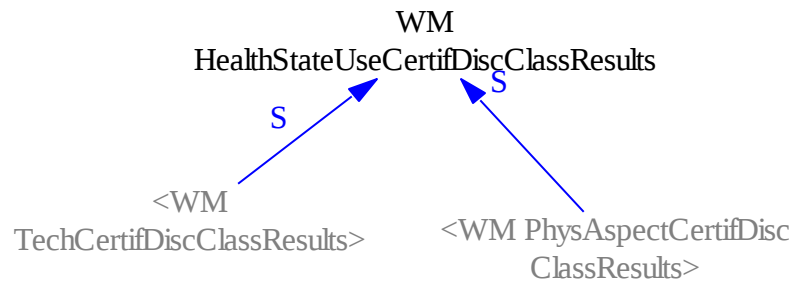


Figure 4.63 - Estimation de la classe du produit_nutriment selon l'état de santé d'utilisation du produit

Équation 4.40

$$WM HealthStateCertifDiscClassResults = \begin{cases} 1, & WM TechCertifDiscClassResults = 1 \text{ et} \\ & (WM PhysAspectCertifDiscClassResults = 1 \text{ ou } WM PhysAspectCertifDiscClassResults = 2) \\ 2, & (WM TechCertifDiscClassResults = 1 \text{ et } WM PhysAspectCertifDiscClassResults = 3) \\ & \text{ou } WM TechCertifDiscClassResults = 2 \\ 3, & WM TechCertifDiscClassResults = 3 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Une fois la durée de requalification écoulee (« *WM TimeCertifDisc* »), l'activité de requalification est terminée (« *WM EndCertifDisc* ») et le lave-linge_nutriment est mis en vente (« *WM SaleDiscOk* ») après un délai pour trouver un acquéreur.

1.2. Evolution de l'état de santé du produit

Dans notre étude de cas, l'état de santé du produit est dépendant des exigences processus et d'utilisation qu'il satisfait à tout instant. Ainsi, pour que cet état soit satisfaisant, le régénérateur doit s'assurer que toutes les exigences associées soient également satisfaites (Figure 4.64 et 4.66) (Équation 4.41et 4.42, où Prod = Product, et TechStat = Technical State).

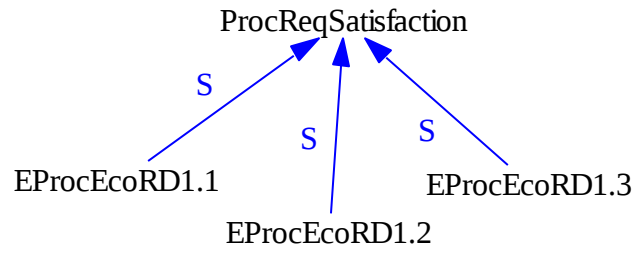


Figure 4.64 - Satisfaction des exigences processus

Équation 4.41

$$ProcReqSatisfaction = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{i=3} EProdEcoRD1.i = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

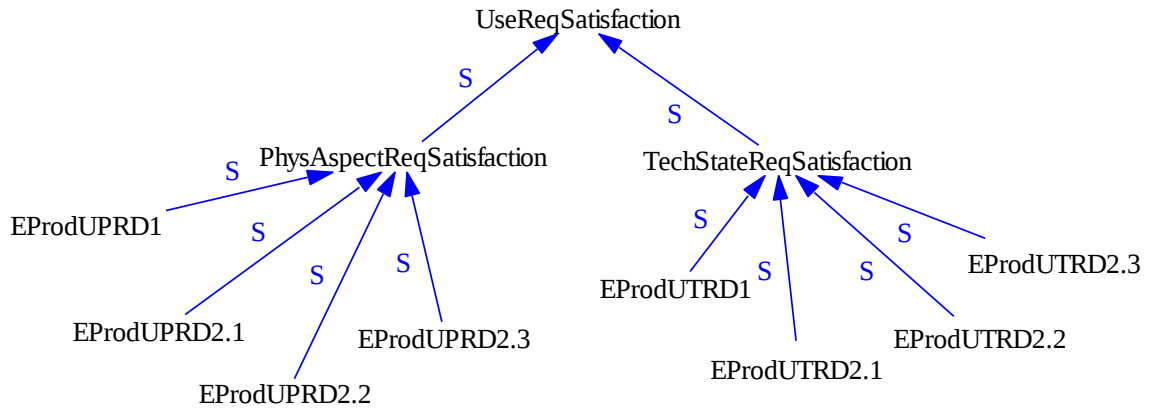


Figure 4.65 - Satisfaction des exigences d'utilisation

Équation 4.42

$$UseReqSatisfaction = \begin{cases} 1, & PhysAspectReqSatisfaction = 1 \text{ et } TechStateReqSatisfaction = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Où } PhysAspectReqSatisfaction = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{i=3} EProdUPRD2.i = 1 \text{ et } EProdUPRD1 = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{Et } TechStateReqSatisfaction = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{i=4} EProdUTRD i = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Au cours des phases d'utilisation et de régénération, les valeurs associées aux exigences produit croissent et décroissent. Ces variations ont une influence sur les régénérations futures du lave-linge. Les variations sont représentées par un stock qui se remplit et se vide selon si le lave-linge est en utilisation ($WM LifeCyclePhase = 1$) ou en remise en état ($WM EndRecondDisc = 1$).

Pour illustrer nos propos, nous prenons comme exemple le taux de rouille « *WM RustyBody* » (Figure 4.66) (Équation 4.43). Cette démarche s'applique à toutes les variables d'exigences portant sur l'état de santé d'utilisation du lave-linge (aspect physique et état technique), et qui ne sont pas des variables « tout ou rien », telles que « *WM SectionnedWires* ».

Nous fixons que le taux de rouille augmente (Équation 4.44) au cours du temps selon un taux aléatoire compris entre [0% ; 8%] pour 10 000h de fonctionnement, et qu'il diminue lorsque des actions de remise en état sont réalisées sur le lave-linge (Équation 4.45). Cette diminution est comprise entre 4% et 7% (taux min et max de rouille pouvant être enlevé lors de la remise en état).

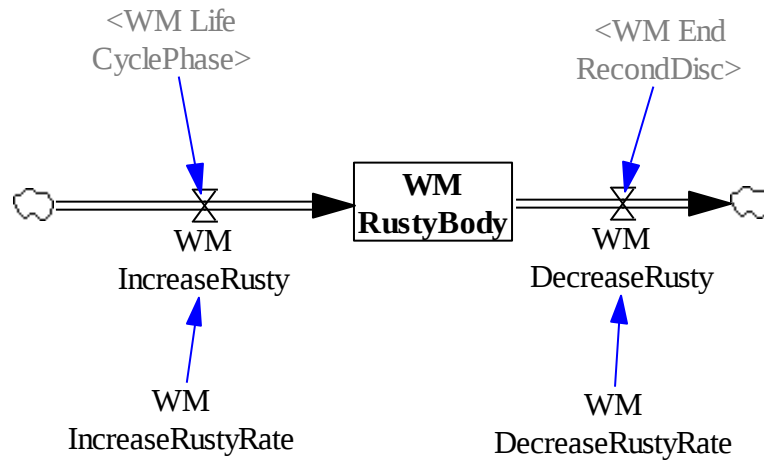


Figure 4.66 - Modélisation du comportement de la rouille sur le lave-linge au cours du temps

Équation 4.43

$$WM\ RustyBody = WM\ IncreaseRusty - WM\ DecreaseRusty$$

Avec une initialisation à 0.

Équation 4.44

$$WM\ IncreaseRusty = \begin{cases} WM\ IncreaseRustyRate, & WM\ LifeCyclePhase = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Où *WM IncreaseRustyRate* est une variable aléatoire comprise entre 0 et 0.0008%

Équation 4.45

$$WM\ DecreaseRusty = \begin{cases} WM\ DecreaseRustyRate, & WM\ EndRecondDisc = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Où *WM DecreaseRustyRate* est une variable aléatoire comprise entre 3 et 7%

Cas particulier du scénario 2 et 3

Dans le cadre des scénarios 2 et 3, la fiabilité et la consommation énergétique dépendent de celles des sous-ensembles : électrovannes (« *SV Reliability* », avec SV = Solenoid Valve), de la carte électronique (« *EC Reliability* », avec EC = Electronic Card) et des autres sous-ensembles (« *Others Reliability* ») (Figure 4.67). La fiabilité du lave-linge correspond à la fiabilité la plus faible parmi celles de ses sous-ensembles (Équation 4.46), et la consommation énergétique correspond à la somme de celles de ses sous-ensembles.

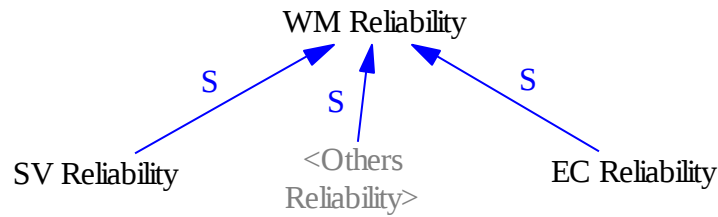


Figure 4.67 - Modélisation de la fiabilité du lave-linge dans les scénarios 2 et 3

Équation 4.46

WM Reliability

$$= \begin{cases} SV \text{ Reliability,} & SV \text{ Reliability} < EC \text{ Reliability et } SV \text{ Reliability} < Others \text{ Reliability} \\ EC \text{ Reliability,} & EC \text{ Reliability} < SV \text{ Reliability et } EC \text{ Reliability} < Others \text{ Reliability} \\ Others \text{ Reliability,} & Others \text{ Reliability} < SV \text{ Reliability et } Others \text{ Reliability} < EC \text{ Reliability} \end{cases}$$

2. Prise en compte des exigences produit

Le régénérateur de déconnexion ne réalisant pas la fonction de décomposition par lui-même, et n'ayant aucun contrôle sur la décomposition réalisée par le fournisseur, le régénérateur ne s'intéresse qu'à l'état de santé du lave-linge_déchet. C'est pourquoi, nous ne modélisons que les exigences d'utilisation (Figure 4.68). Ces exigences portent sur la satisfaction de la variable de l'exigence (Équation 3.23) et sur la satisfaction de la valeur de la variable de l'exigence comparée à celle de la classe souhaitée par le déconnecteur sur le lave-linge_déchet (Équation 4.48).

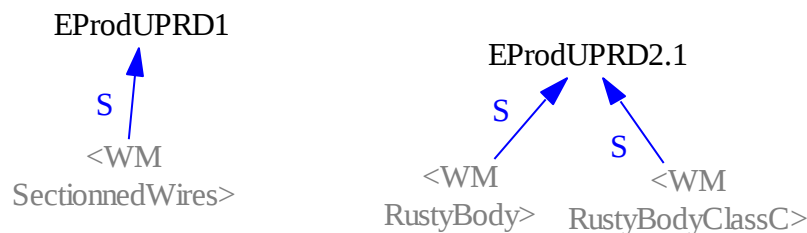


Figure 4.68 - Exigences d'utilisation prises en compte par la déconnexion au moment du diagnostic de remise en état

Équation 4.47

$$EProdUPRD1 = \begin{cases} 1, & WM\ SectionnedWires = 0 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Équation 4.48

$$EProdUPRD2.1 = \begin{cases} 1, & WM\ RustyBody \leq WM\ RustyBodyClassC \\ 0, & sinon \end{cases}$$

La même démarche est appliquée pour toutes les exigences portant sur l'aspect physique et l'état technique.

3. Prise en compte des exigences processus

Les exigences processus s'appuient sur la même modalisation que celles des exigences d'utilisation, et portent la satisfaction de la variable de l'exigence (Équation 3.26), et sur la satisfaction de la valeur de la variable de l'exigence comparée à celle du coût maximum de réalisation de l'activité (Équation 4.50) ou à celle de la capacité maximale de remise en état du régénérateur (Équation 4.51).

Équation 4.49

$$EProcTRD1 = \begin{cases} 1, & Outils\ disponibles = 1 \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Équation 4.50

$$EProcEcoD1.3 = \begin{cases} 1, & FixingDiscCost \leq 45\% * RegenerationDiscCost \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Équation 4.51

$$EProcTRD2 = \begin{cases} 1, & RustyRemovable \leq 4\% \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Les modèles que nous avons créé et instancié, dans cette partie, sont ensuite simulés afin d'éprouver les changements de politique liés à la régénération.

IV. Résultats et discussion

Les logiciels de simulations des System Dynamics ne permettant pas une génération automatique de série de simulation, nous restreignons le nombre de simulations à 60 (lancées manuellement). Pour chaque simulation, un tirage aléatoire est effectué, grâce à une variable « RANDOM » et fait varier les valeurs d'amélioration et de détérioration des caractéristiques observées. Pour une graine donnée (valeur associée à la variable « RANDOM »), les valeurs tirées aléatoirement sont identiques. Il est donc nécessaire de

faire varier cette graine pour obtenir une variation entre les valeurs tirées et identifier les différents comportements du système étudié. Nous faisons varier la variable « RANDOM » entre 0 et 59 avec un pas de 1.

Pour chacune de ces 60 simulations, nous observons le nombre de cycles d'utilisation que connaît le lave-linge, les classes pour lesquelles il a été vendu, et le taux de possession de chaque utilisateur.

Nous rappelons dans Tableau 4.16 les différents politiques, et les scénarios associés, que nous étudions.

Tableau 4.16 - Synthèse des politiques et scénarios étudiés

Politique	Politique 1		Politique 2	Politique 3
Flux	Flux Poussé	Flux Poussé	Flux Tiré	Flux Tiré
Scénario	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	
Eléments de lave-linge modélisés	Lave-linge	- Lave-linge - Electrovanne - Carte Electronique de Commande	- Lave-linge - Electrovanne - Carte Electronique de Commande	
Compléments			Exigences imposées aux fournisseurs : - Seuil de Fiabilité fixé à 96% lors de l'achat du lave-linge_déchet - Fréquence des actions de maintenance Exigences imposées aux et par les régénérateurs : - Marge de 500€ par lave-linge_nutriments Temps minimum d'exploitation du lave-linge pour les fournisseurs	
				Variations de certains paramètres pour obtenir plus de lave-linges_nutriments de classe A (fréquence des maintenances périodiques chez les fournisseurs, capacités de remise en état de la fiabilité des produits_déchets)

1. Politique 1 - Scénario 1

Les simulations, dans le cadre du scénario 1, sont réalisées sur une durée d'observation de 35 000h d'utilisation/régénération du lave-linge. Cette durée correspond à la durée estimée par le fabricant du lave-linge neuf (30 000h), plus les durées de régénération et une durée permettant d'observer le comportement du lave-linge après sa durée de vie estimée.

Sur l'ensemble des simulations effectuées, nous n'avons observé que 4 cas de succession d'utilisateurs, donnés par la Figure 4.69. Nos discussions s'appuient donc sur ces 4 cas. Sur la Figure 4.69, la présence du lave-linge chez le client « laverie » est représentée par la valeur 1, « résidence » par la valeur 2, « restaurant » par la valeur 3. Le désassemblage est représenté par 0.

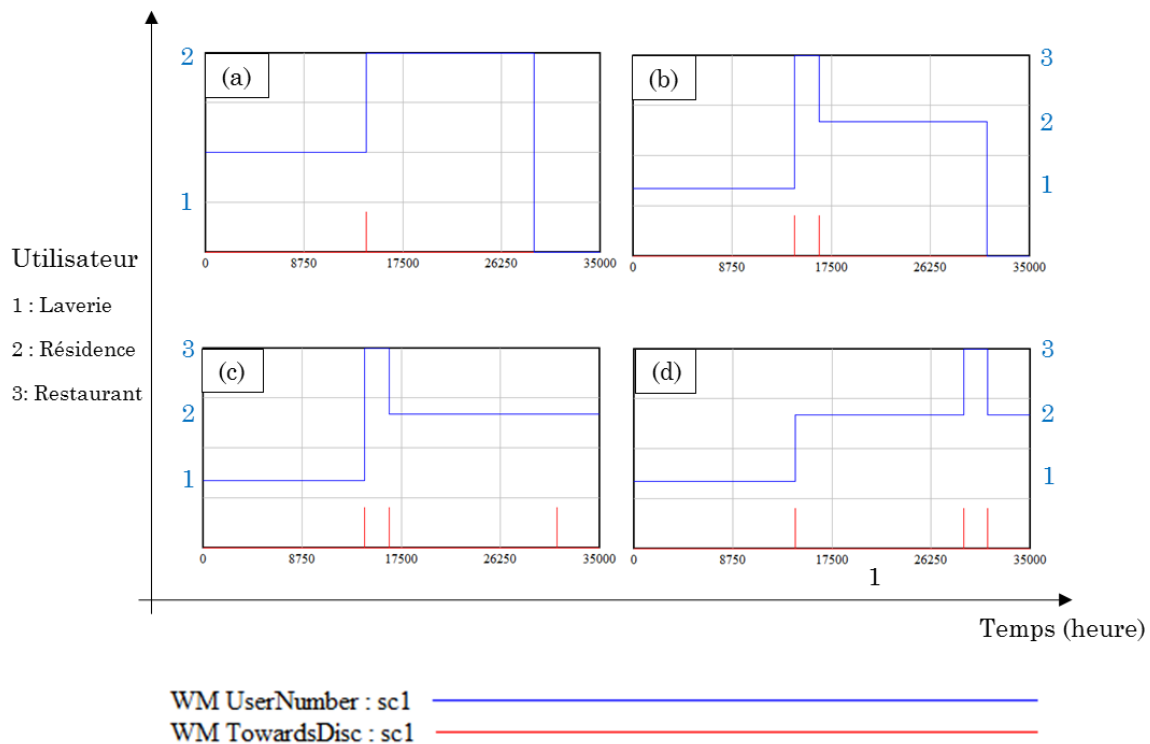


Figure 4.69 - Cas de succession d'utilisateurs observés (courbes bleues) durant les simulations avec indication des instants où le lave-linge_déchet est envoyé en déconnexion (dirac rouges)

Chaque cas observé (Figure 4.69) est discuté ci-après.

Cas (a) – Après la 1^{ère} régénération, l'état de santé du lave-linge satisfait les exigences de la résidence et du restaurant (car caractérisé B), mais la résidence est prioritaire car son niveau d'exigences est plus difficilement atteignable que celui du restaurant, et devient le propriétaire du lave-linge. Ceci a pour conséquence que le restaurant ne possède jamais le lave-linge dans ce cas.

Le lave-linge part directement en désassemblage après avoir été utilisé par la laverie, puis par la résidence. Ceci est dû à une dégradation de l'exigence de la consommation énergétique, qui passe au-dessus des seuils souhaités par les clients, et dont l'écart « seuil – consommation énergétique estimée » est trop élevé par rapport aux capacités de remise en état du régénérateur (capacité max : 0,035 kWh) (Figure 4.70).

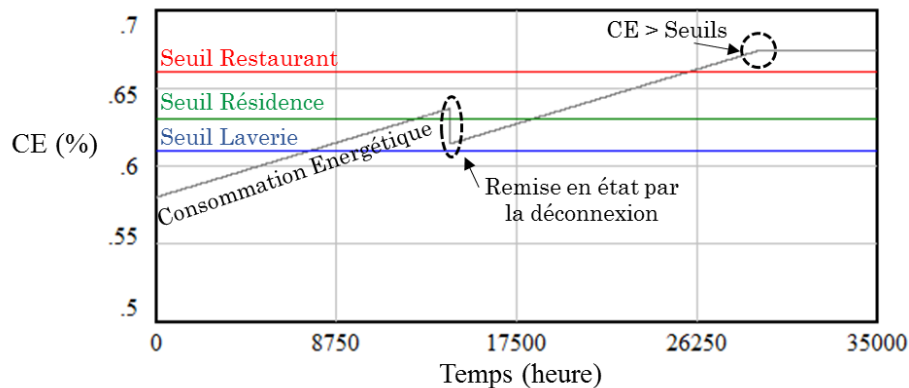


Figure 4.70 - Exemple observé d'évolution de la consommation énergétique (CE)

Cas (b) – Par rapport au cas (a), le lave-linge est acheté par un restaurant avant de l'être par une résidence. En effet, après l'utilisation par la laverie, l'état de santé du lave-linge est caractérisé C, mais est proche des exigences de classe B. L'état de santé du lave-linge étant peu détérioré par le restaurant, il reste proche de la classe B, permettant au déconnecteur de faire passer le lave-linge de la classe C à B après remise en état. Après la 3^{ème} utilisation, le lave-linge est désassemblé car il ne satisfait plus l'exigence de consommation énergétique.

Cas (c) – Par rapport au cas (b), le lave-linge connaît 4 cycles d'utilisation. Après la 3^{ème} utilisation, le lave-linge est de nouveau classé B après remise en état, et peut être vendu à une résidence. Toutefois, le lave-linge ne connaîtra pas d'autres cycles d'utilisation car après 30 000h d'utilisation, il entre dans sa phase d'usure, entraînant une non-satisfaction de l'exigence de fiabilité (Figure 4.71).

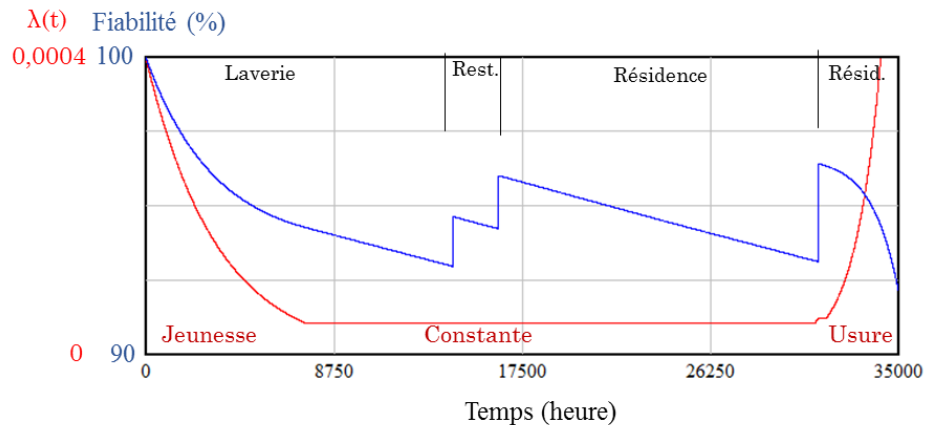


Figure 4.71 - Exemple de taux de défaillance et d'évolution de la fiabilité

Cas (d) – Le cas (d) reprend le début du cas (a), mais au lieu d'être désassemblé, le lave-linge est vendu à un restaurant. Après la 3^{ème} utilisation, l'état de santé est peu détérioré, et peut passer de la classe C à la classe B, et être vendu à une résidence. Toutefois, lors de la 4^{ème} utilisation, le lave-linge entre dans sa phase d'usure, engendrant son désassemblage au moment de la régénération.

Nombre de cycles d'utilisation

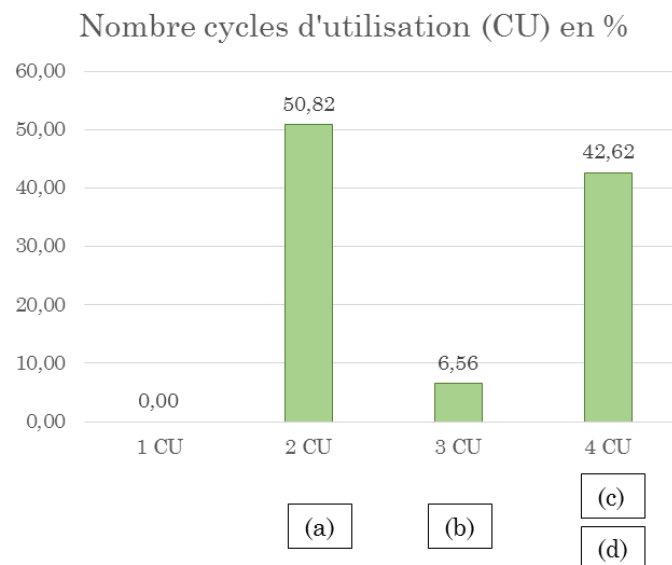


Figure 4.72 - Nombre de cycles d'utilisation observés

Dans 50% des cas observés (sur les 60 simulations), le lave-linge connaît 2 cycles d'utilisation (Figure 4.72), ce qui correspond à la succession « laverie – résidence » (cas d (Figure 4.69(d))). Dans 43% des cas observés (sur les 60 simulations), le lave-linge connaît au moins 4 cycles d'utilisation (Figure 4.69(c) et (a)). Parmi tous les cas observés, celui où

le lave-linge n'est pas réemployé après sa première utilisation n'apparaît jamais puisqu'il satisfait à chaque fois les exigences de la résidence et/ou du restaurant.

Classes du lave-linge_nutriment

Le passage du lave-linge chez les clients « restaurants » détériore peu son état de santé, et permet de le rehausser fréquemment grâce à la régénération. En augmentant le nombre de clients « restaurants », il est possible d'augmenter, de manière significative, le nombre de cycles d'utilisation. Par exemple, en imposant qu'après chaque utilisation supérieure à 10 000h, le lave-linge soit obligatoirement vendu à un restaurant.

Parmi l'ensemble de nos simulations, la classe A n'est pas observée (Figure 4.73). En effet, elle correspond à un produit neuf ou s'en rapprochant le plus possible. Cette classe n'est donc pas aisément atteignable par la régénération, même en changeant plusieurs éléments du lave-linge. Ceci est compréhensible puisqu'après plus de 14 000h de fonctionnement, tout équipement ne peut avoir des performances comparables à celles du neuf.

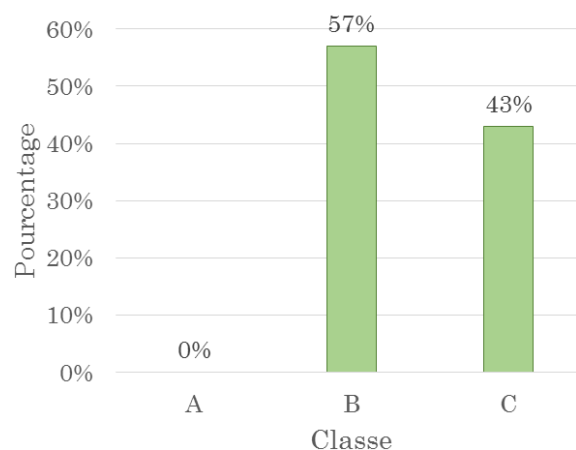


Figure 4.73 - Classes satisfaites par le lave-linge au moment de la vente

Ce premier scénario nous a permis de présenter l'utilisation de la simulation pour évaluer une politique de régénération.

2. Comparaison Politique 1 et Politique 2

Les simulations des scénarios 2 et 3 sont réalisées sur une durée d'observation de 50 000h. A cette date, 95% des lave-linges ont été désassemblés.

Les résultats que nous observons portent sur le nombre de cycle d'utilisation connus par le lave-linge, et les classes du lave-linge_nutriment obtenues après remise en état.

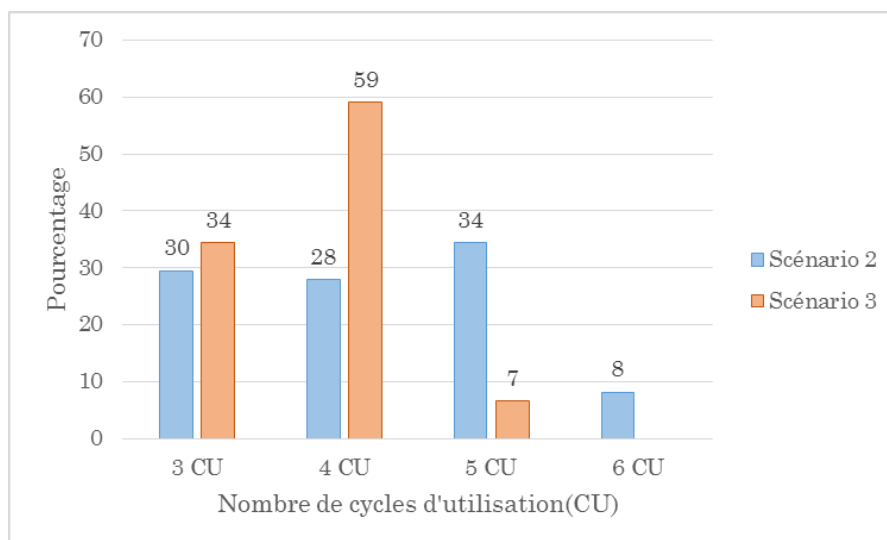
Nombre de cycles d'utilisation

Figure 4.74 - Pourcentage de lave-linges ayant connus X cycles d'utilisation (CU) pour les scénarios 2 (bleu) et 3 (orange)

Sur la (Figure 4.74), nous observons que les lave-linges du scénario 2 (S2) connaissent plus de cycle d'utilisation que ceux du scénario 3 (S3) (8% connaissent 6 cycles d'utilisation pour S2 et 7% connaissent 5 cycles d'utilisation pour S3).

Lorsque l'on s'intéresse à la durée de vie moyenne du lave-linge dans le cas du S2 et du S3, nous constatons que ces durées sont très proches. Ces durées peuvent être obtenues en connaissant le nombre de fois où chaque cas se présente (succession des utilisateurs), et la date à laquelle le lave-linge n'est plus régénérable par la déconnexion, il est possible de déterminer la durée de vie moyenne d'un lave-linge.

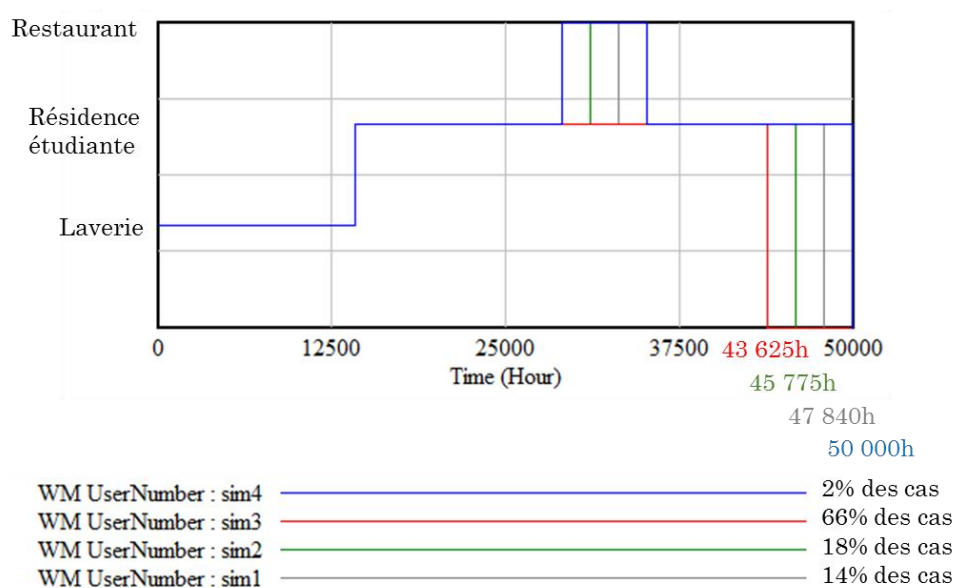


Figure 4.75 - Date de fin de vie des lave-linges selon les cas observés du scénario 2

La Figure 4.75 représente l'ensemble des cas rencontrés lors des simulations du scénario 2 sur la politique 1 selon les utilisateurs exploitant le lave-linge_nutriment. Cette figure donne également les taux d'apparition des 4 cas rencontrés, et la date à laquelle le lave-linge n'est plus régénérable par la déconnexion (fin de vie du lave-linge). Ainsi, la durée de vie moyenne d'un lave-linge dans ce scénario est de 44 739h.

La Figure 4.76 représente l'ensemble des cas rencontrés lors des simulations du scénario 3 sur la politique 2 selon les utilisateurs exploitant le lave-linge_nutriment. Cette figure donne également les taux d'apparition des 4 cas rencontrés, et la date à laquelle le lave-linge n'est plus régénérable par la déconnexion (fin de vie du lave-linge). Ainsi, la durée de vie moyenne d'un lave-linge dans ce scénario est de 44 435h.

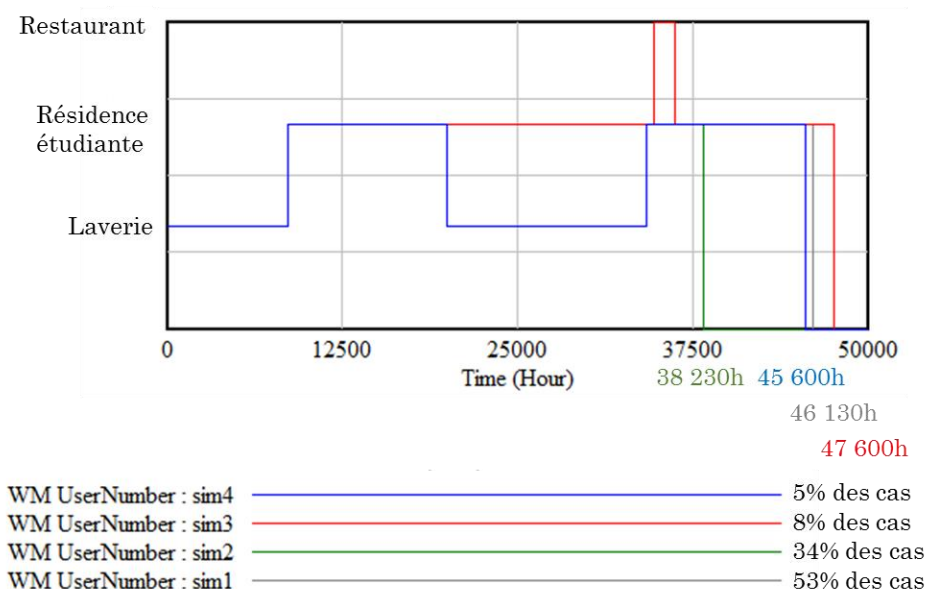


Figure 4.76 - Date de fin de vie des lave-linges selon les cas observés du scénario 3

Les résultats obtenus montrent que la durée de vie moyenne est équivalente entre le cas du flux poussé (S2) et du flux tiré (S3). Dans notre cas d'étude, ce n'est donc la durée de vie moyenne des lave-linges qui justifient la mise en place du flux tiré. Ici, l'intérêt du flux tiré est tout autre, puisqu'il permet d'obtenir un niveau de classes plus élevé que celui du flux poussé (Figure 4.77).

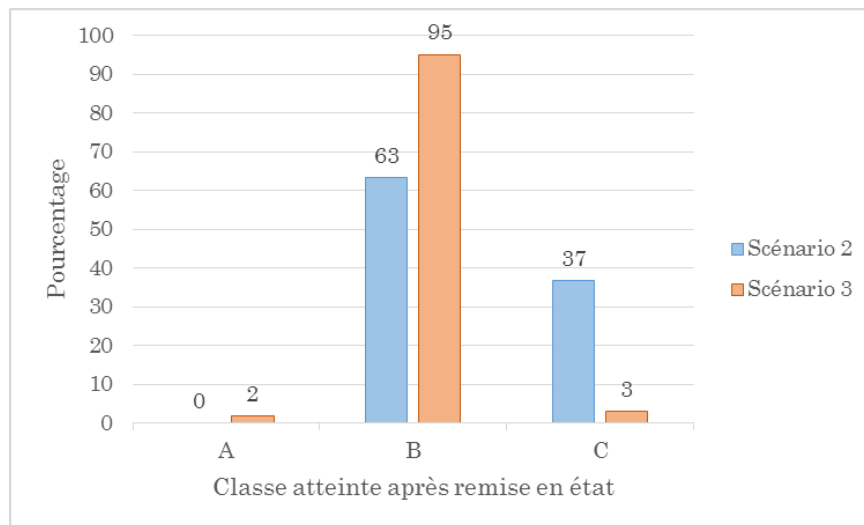
Classe des lave-linges_nutriments

Figure 4.77 - Pourcentage de classes atteintes après remise en état du lave-linge pour les scénarios 2 (bleu) et 3 (orange)

Dans le cas du S2, 37% des lave-linge sont vendus en tant que classe C, c'est-à-dire au client de type restaurant. Ce type de client utilise le lave-linge sur une très courte période comparée à celles des laveries et des résidences. L'état de santé du lave-linge diminue donc peu, et la capacité de remise en état du déconnecteur augmente cet état à chaque régénération permettant de vendre de nouveau le lave-linge. Plus le nombre de clients de type restaurants successifs est important, plus le nombre de cycles d'utilisation l'est.

En revanche pour le S3, 95% des lave-linges sont vendus en tant que classe B, donc à une résidence étudiante. Ce type de client exploite le lave-linge plus longtemps que le restaurant accentuant la dégradation de l'état de santé du lave-linge. Le lave-linge ne devrait pas connaître plus de 3 ou 4 cycles d'utilisation (comme pour le S1). Toutefois, grâce aux actions de maintenance périodique du S3, l'état est maintenu à un niveau, permettant d'accroître la durée de vie du lave-linge.

Nous pouvons également remarquer que dans le cas du scénario 3, grâce aux exigences imposées aux fournisseurs, le régénérateur est capable de produire des lave-linges_nutriments de classe A (5%).

D'un point de vue environnemental, le flux tiré est, comme nous le pressentions, plus intéressant que le flux poussé car il permet d'allonger la durée de vie des équipements tout en ayant la possibilité de s'adresser à un plus grand nombre de clients (car la classe de l'état de santé est plus élevée).

3. Politique 3

Dans le scénario 3, nous avons vu que la classe A peut être atteinte. Le régénérateur des lave-linges souhaite donc augmenter ce taux, en atteignant au moins 5% des lave-linges_nutriments de classe A, voire dépasser les 10%.

Pour cela, la société doit s'intéresser aux variables des exigences d'utilisation dont les valeurs sont inférieures à celles des seuils bas de la classe A. Parmi les simulations que nous avons réalisées, le passage de la classe A vers la classe B est dû à la fiabilité et à la consommation énergétique du lave-linge_déchet. Pour avoir un lave-linge_nutriment de classe A, il faut donc que ces deux variables soit de classe A ou proche de cette classe.

Nous constatons que lors de la première régénération, c'est la variable de fiabilité qui est de classe B, alors que celle de la consommation énergétique est de classe A. En théorie, la classe A doit pouvoir être atteinte par la fiabilité après la remise en état du lave-linge_déchet. Toutefois, cela n'est vrai que dans 5% des cas (Figure 4.77).

Pour que la variable de fiabilité puisse être classée A, le régénérateur peut modifier :

- Cas 1 - Sa capacité de remise en état concernant la fiabilité,
- Cas 2 - Les exigences qu'il impose aux fournisseurs :
 - o Cas 2.1 - La fréquence des actions de maintenance périodique
 - o Cas 2.2 - Le niveau de fiabilité exigée lors de l'acquisition du lave-linge_déchet.

Dans le cas 1, nous proposons de rehausser sa capacité minimale de remise en état concernant la fiabilité de 0.5%. Cette hausse permet au régénérateur de produire 22% de lave-linges_nutriments de classe A (Figure 4.78), soit une hausse de plus de 15% par rapport au scénario 3.

Dans le cas 2.1, nous proposons de multiplier par 1.5 la fréquence des actions de maintenance périodique imposées aux fournisseurs, soit une maintenance tous les 2 mois pour la laverie, 4 mois pour la résidence étudiante et 6.5 mois pour le restaurant. Cette intensification des maintenances permet au régénérateur de produire 19% de lave-linges_nutriments de classe A (Figure 4.78), soit une hausse de presque 15% par rapport au scénario 3.

Le cas 2.2 n'est pas envisagé car le niveau de fiabilité imposé par le régénérateur (96%) est estimé suffisant et déjà assez contraignant pour les fournisseurs. Le régénérateur ne leur impose donc pas de faire un effort supplémentaire par rapport à cette exigence.

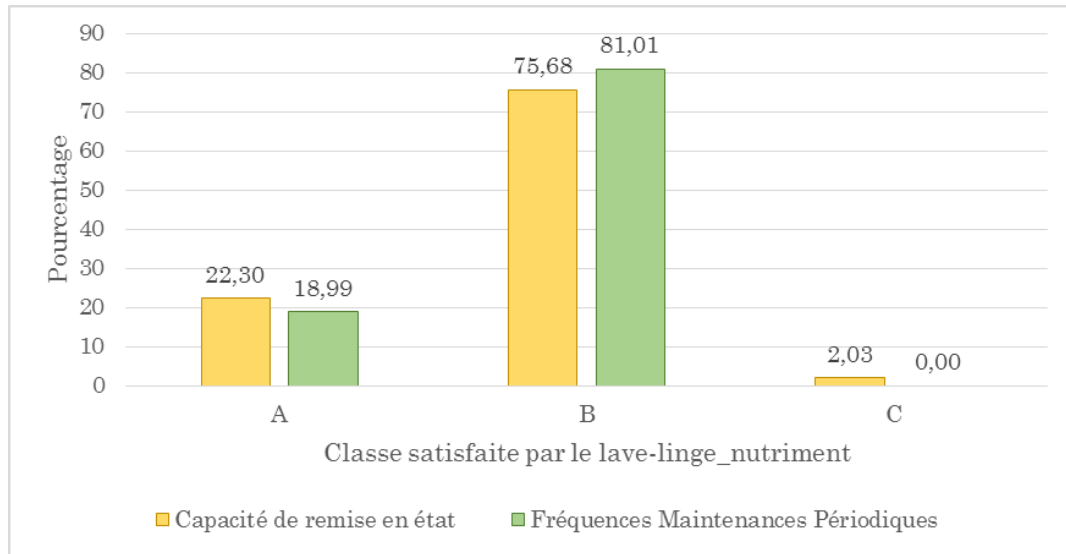


Figure 4.78 - Pourcentage de classes atteintes après remise en état du lave-linge dans le cas d'un changement des capacités de remise en état (jaune) et d'une augmentation de la fréquence des actions de maintenance périodique chez le fournisseur (vert)

Nous constatons (Figure 4.78) que les modifications faites dans le cas 1 et 2.1 produisent un taux de lave-linges_nutriments proche l'un de l'autre, et sont donc potentiellement des solutions intéressantes pour le régénérateur.

Lorsque l'on s'intéresse au nombre de cycles d'utilisation connus par le lave-linge, nous constatons (Figure 4.79) que dans le cas 2.1, 93% des lave-linges connaissent 4 cycles d'utilisation contre 43% pour le cas 1.

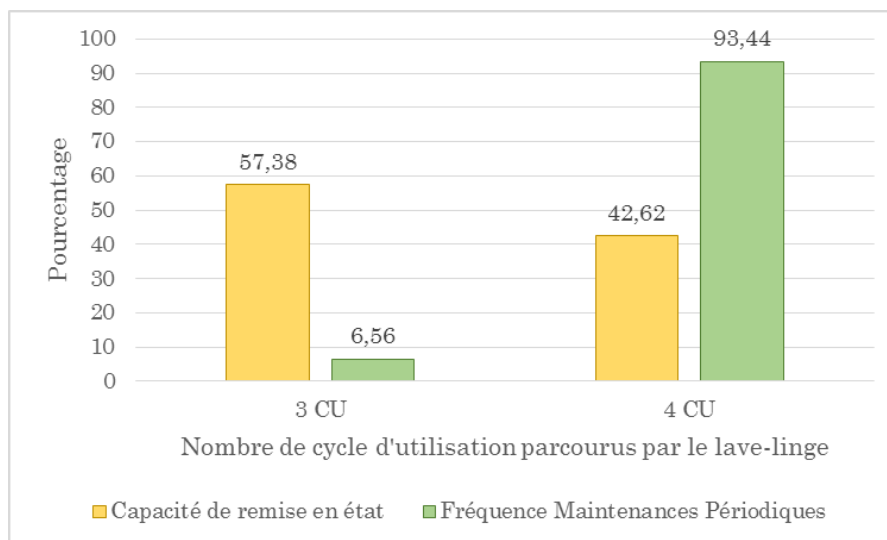


Figure 4.79 – Nombre de cycle d'utilisation connus par le lave-linge dans le cas d'un changement des capacités de remise en état (jaune) et d'une augmentation de la fréquence des actions de maintenance périodique chez le fournisseur (vert)

En se focalisant uniquement sur le nombre de produits_nutriments de classe A et le nombre de cycles d'utilisation, la conclusion est que le régénérateur doit imposer une

fréquence d'actions de maintenance plus importante aux fournisseurs. Toutefois, c'est sans compter sur l'aval des fournisseurs. En effet, dans ce cas, il faut que les fournisseurs soient prêts à augmenter le nombre de maintenance, et donc à augmenter les frais réalisés sur le lave-linge, sans être certain de pouvoir accroître les bénéfices dégagés lors de la mise en vente de leur lave-linge_déchet.

Finalement, la mise en place du cas 1 est la meilleure solution à court terme pour le régénérateur, car elle ne dépend que de son propre investissement qu'il peut éventuellement amortir en augmentant le prix de vente des lave-linges_nutriments.

V. Conclusion – Perspectives

Au travers des différentes simulations, nous avons pu voir que, le nombre de simulation est certes faible, mais il est suffisant pour faire apparaître l'ensemble des cas possibles.

La modélisation de la régénération industrielle nous a permis de confirmer, par le biais d'un cas d'étude, que la régénération était une bonne solution pour réduire les matières premières extraites dans la sphère naturelle et les produits rejetés (aspect environnemental) tout en continuant à satisfaire les besoins des différents clients (aspect économique). Ce phénomène s'intensifie lorsqu'une logique de flux tiré est mise en place.

Dans ce cas d'étude, nous avons fixé de nombreux paramètres et fait de nombreuses hypothèses. Toutefois, les comportements observés bien que dépendants des valeurs sont à évaluer de façon globale. En effet, les variations des taux de défaillance, les seuils,... peuvent faire varier les comportements, et modifier le nombre de lave-linges_déchets traités par la déconnexion, la classe des lave-linges_nutriments, le nombre de cycles d'utilisation des lave-linges, et leur durée de vie moyenne. Ce phénomène a été observé lors de la mise en place de la politique 3, où un léger changement de capacité de remise en état a permis de rehausser le nombre de classe A obtenues pour un produit_nutriments. Toutefois, d'autres simulations doivent être réalisées afin de déterminer l'impact réel des variables sur la régénération d'un produit_déchet (analyse de sensibilité).

Au travers de notre étude de cas, nous avons constaté que même si l'aspect environnemental était satisfait par les flux poussé et tiré, l'aspect économique n'est pas toujours satisfait selon le flux mis en place (voir Annexes – Chapitre 4 – II et III).

Nous avons également montré que la modélisation que nous proposons et l'outil utilisé permettent d'évaluer la pertinence de la mise en place de certaines politiques de

régénération, et d'identifier les paramètres à modifier pour les mettre en place tout en satisfaisant les exigences que chaque partie prenante impose et/ou s'impose. Toutefois, cet outil présente de nombreuses limites, ne serait-ce parce qu'il ne permet pas de générer une série de résultats pour une graine donnée. En effet, pour obtenir cette série de résultats, il est nécessaire de mettre en place, et de faire varier une variable permettant de modifier les valeurs tirées de manière aléatoire, ce qui limite grandement le nombre de simulations, notamment lorsque des relevés doivent être réalisés pour comparer l'ensemble des situations rencontrées.

Une des solutions à ce problème aurait pu être de dupliquer n fois les modèles réalisés pour un lave-linge, créant une multitude de variables pouvant toutes évoluer de manière différentes selon le lave-linge observé. Toutefois, l'outil n'est pas en mesure de traiter un si grand nombre de variables.

De plus, même pour les modélisateurs, il est difficile de gérer un grand nombre de variables. En effet, dans le cas d'étude développé dans ce chapitre, plus de 150 variables ont été nécessaires pour modéliser le comportement du lave-linge au sein des phases d'utilisation et de régénération dans le cas simple du scénario 1 (qui ne considère que le lave-linge). Ce nombre explose lorsque nous passons au scénario 2, avec l'ajout de deux sous-ensembles, puis au scénario 3, avec la gestion des exigences imposées aux fournisseurs (cf. en Annexes – Chapitre 4- I) les modèles réalisées dans le cas du scénario 3 en considérant trois électrovannes et trois cartes électronique de commande représentant les pièces de rechanges remplacées dans le lave-linge lors des défaillances sur ceux d'origine).

L'un de nos objectifs dans ce chapitre était de pouvoir considérer les différents cycles d'utilisation et de régénération pour un lave-linge ET pour ses sous-ensembles. Toutefois, il n'a pu être mené à bien, et nous n'avons pu modéliser que les cycles du lave-linge car, même si les modèles sont récursifs, il est nécessaire de vérifier que l'ensemble des variables utilisées dans chaque modèle se rapportent bien à l'élément considéré (lave-linge, électrovanne ou carte électronique de commande). De plus, il faut s'assurer que les modèles réalisés couvrent bien l'ensemble de la durée d'observation, et que leur évolution dans le temps débute au bon instant (deux électrovannes ne peuvent être présentes au moment instant dans le lave-linge). Par exemple, si chaque électrovanne tombe en panne à leur date minimale (15 500h) et que la durée d'observation est de 50 000h, il faut dupliquer 4 fois les modèles de comportement de l'électrovanne pour que le comportement du lave-linge soit modélisé sur les 50 000h (cas des scénarios 2 et 3).

Finalement, la modélisation du comportement des produits durant leur cycle de vie est réalisable sur des modèles à très petite échelle mais devient irréaliste lorsque l'on passe à une échelle plus grande, ce qui est notre cas, notamment lorsque l'on considère le cycle de vie des sous-ensembles.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons débuté une étude avec le groupe PAPREC sur différents types de moteurs (industrielles, lave-linges, aspirateurs, ventilateur et sèche-linges) afin de déterminer quel régénérateur était en mesure de les régénérer. Les moteurs fournis étaient tous déconnectés de leur environnement (phase de décomposition de la déconnexion). Nous étions donc dans le cas d'un flux poussé où nous n'avions aucune maîtrise ni connaissances des moteurs à régénérer.

Durant cette étude, nous nous sommes intéressés aux différents critères que devait satisfaire un moteur pour réussir le diagnostic de remise en état du moteur et celui de décomposition du désassemblage. Nous avons également réalisé quelques phases de décomposition lorsque cela s'avérait possible. Toutefois, notre étude n'a pu aboutir et être implémentée dans nos modèles car, par manque de moyens (bancs de tests, connaissances, compétences...) et de temps, seul le diagnostic de remise en état sur l'aspect physique a pu être réalisé. Celui de l'état technique reste à faire pour déterminer si le moteur peut être réemployé en tant que tel ou s'il doit être désassemblé, le cas échéant.

Nous espérons que cette collaboration pourra se prolonger dans le futur afin d'éprouver les travaux réalisés dans cette thèse sur d'autres types des produits, et de les confronter à la réalité.

Conclusion Générale et Perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse traitent du paradigme de régénération comme solution à la raréfaction des ressources naturelles et à l'accumulation des déchets. La définition de ce paradigme s'appuie sur les travaux réalisés dans le cadre de l'économie circulaire et du développement durable.

Dans ce manuscrit, nous avons revisité et approfondi la définition de la régénération industrielle en accentuant le parallèle, déjà fait par la fondation Ellen MacArthur, avec la sphère naturelle (Contribution 1), qui fait la promotion du réemploi de tout produit manufacturé. Cette définition nous a permis de mettre en avant la nécessité de développer des processus capables de supporter la régénération des déchets à tout instant et sous toutes leurs formes. Toujours dans l'objectif de supporter la régénération, différents types d'exigences ont été identifiés (Contribution 2), venant compléter les référentiels d'exigences produit déjà existants. Afin de s'assurer que ces exigences soient satisfaites à tout instant, ou qu'elles puissent être de nouveau satisfaites par la régénération, nous avons mis en évidence que le processus de maintenance était le plus à même de répondre à ce besoin (Contribution 3). De plus, de par ces activités, ce processus est capable de prévoir une dérive au niveau des exigences, et d'y remédier avant qu'elle ne soit effective (Prognostics for Health and Regeneration Management). Afin d'aider le processus de maintenance, et les parties prenantes de la régénération, à mettre en place ce paradigme, nous avons proposé différentes politiques de régénération dont nous avons analysé la viabilité au travers d'un cas d'étude portant sur la régénération d'un D3E (Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques). Ce cas d'étude s'appuie sur les modèles et les équations que nous avons proposés pour modéliser le comportement d'un produit au sein des processus de régénération, et la prise en compte des exigences liées à cette régénération (Contribution 4).

De nombreuses perspectives, scientifiques et applicatives, peuvent être formulées pour nos travaux. En effet, ceux-ci nécessitent d'être approfondis en complétant certains aspects, tels que les exigences produits et processus, les piliers du développement durable, l'étude de l'impact de la variation des paramètres de régénération..., par rapport à ce qui a été présenté dans ce manuscrit, et en approfondissant les différents axes auxquels fait appel la régénération.

Sur la partie simulation pour l'évaluation de la stratégie de régénération, il serait intéressant à un court terme d'augmenter le nombre de simulations sur l'étude de cas que nous avons proposée, et de réaliser une analyse de sensibilité sur les valeurs choisies pour

les variables. En effet, les premiers résultats semblent intéressants mais il faudrait conforter les premières analyses par une étude plus approfondie. De même, les modèles créés doivent être appliqués à d'autres cas d'applications, notamment des cas mobilisant des données réelles afin d'en valider la robustesse. Dans ce sens, un début de collaboration a été initié avec la société PAPREC autour de la régénération des moteurs électriques de D3E. Pour l'instant, une analyse des caractéristiques de l'état de santé des moteurs, ainsi qu'une analyse de leur aptitude à la régénération ont été effectuées, et une proposition de diagnostic a été faite. A un court terme, notre outil d'aide à la décision pourrait être évalué sur un jeu de données réelles autour de ces moteurs (d'autres filaires sont en cours d'étude).

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 3, la régénération nécessite de nombreuses prises de décision qui peuvent avoir un impact sur le cycle de vie du produit. En effet, à l'image de la nature où une simple étincelle peut engendrer de grosses catastrophes, une mauvaise décision prise, ou une mauvaise action de remise en état, peut entraîner le retrait du produit_déchet et sa valorisation énergétique.

Les industriels doivent également tenir compte de l'aspect économique et social du développement durable. La proposition d'aide à la décision faite dans ce manuscrit est une première solution pour asseoir les décisions et les paramètres associés aux différentes étapes de la régénération. Il faudrait enrichir cette proposition pour couvrir les 3 piliers du développement durable, c'est-à-dire, environnemental (coûts environnementaux de régénération...), économique (niveaux d'investissements, rentabilité de la régénération...) et social (difficulté des tâches, impact sur l'emploi...).

Nos travaux ont cherché à montrer que la réduction de la quantité des produits_déchets rejetés a un impact sur l'environnement (et la santé humaine). Il faudrait également intégrer l'aspect coût énergétique de la régénération (consommation énergétique, CO2 produit pour régénérer un produit_déchet...), ainsi que les aspects sociétaux (emplois, compétences métiers, sécurité, santé...) dans l'évaluation de la régénération.

Concernant les perspectives à long terme, celles-ci se focalisent sur les compétences et métiers à mettre en place autour de et pour la régénération. En effet, la régénération, pour qu'elle soit effective, doit être prise en compte à tous les niveaux du cycle de vie du produit, notamment lors des phases de conception, d'exploitation et de retrait.

La phase de **conception** est prépondérante dans la régénération industrielle, car elle conditionne le potentiel initial de régénération du produit. En effet, la régénération d'un produit repose sur sa bonne conception. Si celle-ci a été réalisée en accord avec la

régénération, les phases de vie qui succèdent à la conception n'ont plus qu'à veiller à ce que le produit reste régénérable. Cependant, à l'heure actuelle, la conception et la mise en place du système de régénération d'un produit sont initiées par des sociétés différentes de celle qui a conçu initialement le produit. De plus, la conception du système de régénération est pensée en décalage de la conception du produit, parfois même, elle se fait lorsque le produit arrive en fin de vie (Figure Ccl.80 - 1).

En première perspective, il serait intéressant, comme nous l'avons montré dans cette thèse, d'intégrer au plus tôt les exigences de régénération sur le produit (à l'image des travaux réalisés par (Dufrene et al., 2013) visant à intégrer les contraintes de remanufacturing tout au long du processus de conception), mais également de penser le système de régénération dès la conception du produit (Figure Ccl.80 - 2).

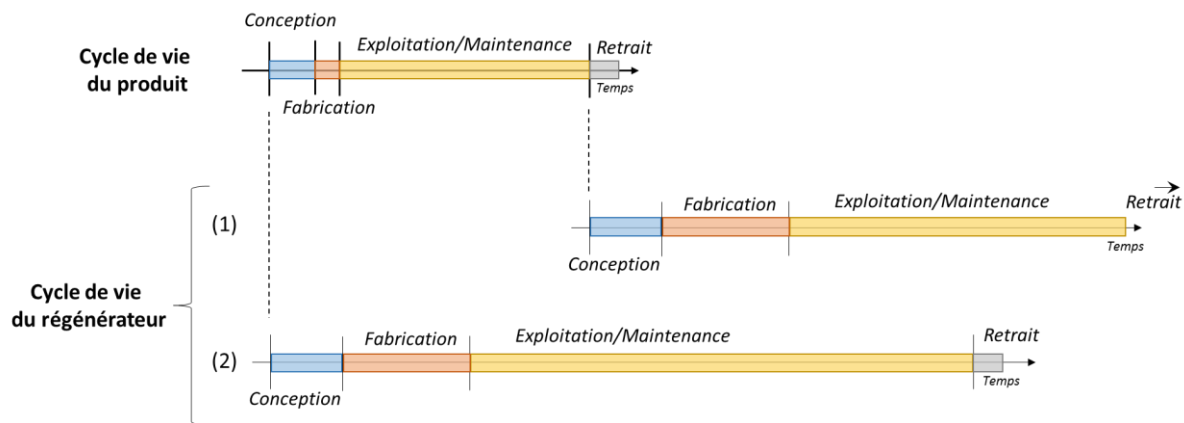


Figure Ccl.80 - Cycles de vie d'un produit et de son régénérateur conçu après et en même temps que le produit

Une deuxième perspective serait que le système de régénération (régénérateurs et leurs activités) soit vu comme un système de soutien au produit_déchet, à l'image du « Soutien Logistique Intégré », et qu'il soit considéré, pensé et fabriqué en même temps que le produit. Nous pourrions parler de système de régénération intégré. Cette nouvelle vision, changerait l'écosystème d'entreprises en proposant que les fabricants de produits soient également les régénérateurs de ceux-ci. Ainsi au lieu de vendre un produit, les sociétés vendraient un service et gèreraient la régénération des produits, qu'elles ont manufacturés, de manière plus intégrée.

Comme nous l'avons montré, durant la phase d'exploitation d'un équipement, la **maintenance** joue un rôle primordial dans le paradigme de régénération.

En effet, dans ce paradigme, la maintenance est considérée comme une fonction centrée sur le produit (Iung and Levrat, 2014), et non plus comme un service pour la fonctionnalité de l'équipement. Ainsi, la maintenance a, en plus de sa fonction classique, pour objectif de maintenir le potentiel de régénération de l'équipement à travers le temps (Regeneration

Centered Maintenance). Pour cela, une perspective pourrait être d'étendre les actions de maintenance, et d'adapter les méthodes d'analyses, d'ingénierie de la maintenance... utilisées classiquement, à la régénération. En ce sens, la maintenance devrait mettre à place de nouveaux plans de maintenance, de nouveaux protocoles de surveillance, ou encore, prédire d'autres situations, telles que les défaillances de régénération (dé-génération). A titre d'exemple, le processus de pronostic (Voisin et al., 2010) pourrait être adapté afin qu'il puisse déterminer la durée de vie résiduelle de l'équipement avant qu'il ne perde son potentiel de régénération, et ainsi éviter dé-génération. L'anticipation de ces défaillances permettrait d'éviter à un produit_déchet d'être directement déstructuré (transformation en matières_nutriments), et par conséquent, d'augmenter la quantité de produits_nutriments disponibles (équipements de production et/ou pièces détachées) sur le marché.

Concernant la phase de retrait, un nouveau problème se pose face à la demande croissante de produits personnalisés. L'émergence de l'« **Usine du Futur** » (Industrie 4.0) permet de répondre à cette demande, engendrant un accroissement de la variabilité des produits manufacturés, et soulevant la question de la régénération de ces produits. En effet, cette personnalisation de masse des produits va engendrer un flux de produits_déchets ayant une forte variabilité sur leurs caractéristiques techniques, leur aspect physique et leur état de santé, en plus des différences de gammes de produits, de tailles, de niveau complexité...

La régénération des produits_déchets personnalisés va nécessiter des opérations de régénération différentes selon la personnalisation du produit_déchet, et donc, engendrer différentes trajectoires au sein des processus de régénération. Une perspective par rapport aux concepts et principes de l'« Usine du Futur » pourrait être de proposer des lignes de démantèlement flexibles et adaptables au produit_déchet. Les nouvelles technologies (Zimmermann et al., 2017) de l'industrie 4.0 devraient aider à la mise en place de telles lignes de démantèlement par l'utilisation des robots collaboratifs, des robots autonomes, de la réalité augmentée, des outils connectés... Des premières réflexions sont menées dans ce sens à l'AIPL de Nancy pour proposer une ligne de démantèlement flexible en fonction du type de produit_déchet, de l'état de santé de celui-ci et des ressources disponibles.

Afin de mettre en place la régénération, l'une des conditions majeures est que les entreprises créent des écosystèmes reposant sur des **échanges d'informations**. En effet, disposer d'un **suivi du produit** sur l'ensemble de ses cycles d'utilisation permettrait aux entreprises de maintenir et de garantir le potentiel de régénération du produit. Pour

réaliser ces échanges, une piste est d'utiliser les travaux réalisés dans le cadre du Closed Loop PLM (Product Life Management) (Kiritsis, 2011), de la matière communicante (Kubler and Derigent, 2014)... Ainsi, le produit porterait les informations liées à sa fabrication (matières utilisées, nomenclature...), à son maintien (actions de maintenance réalisées, dates des opérations de maintenance,...), à son retrait (actions de régénération réalisées et/ou réalisables, suggestion d'ordonnancement des tâches de décomposition, ...), aux cycles d'utilisation connus, à son état de santé...

Bibliographie

- Abichou, B. (2013), “Contribution à la formalisation de bilans / états de santé multi-niveaux d’un système pour aider à la prise de décision en maintenance : agrégation d’indicateurs par l’intégrale de Choquet”, Université de Lorraine.
- ADEME. (2016), *Déchets : Chiffres-Clés*.
- AFNOR. (2006a), “NF EN ISO 14040 : Management Environnemental - Analyse du Cycle de Vie”, Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR. (2006b), “ISO 14044: Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines”.
- Ajukumar, V.N. and Gandhi, O.P. (2013), “Evaluation of green maintenance initiatives in design and development of mechanical systems using an integrated approach”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 51, pp. 34–46.
- Akturk, A. (2016), *Regenerative Design and Development for a Sustainable Future: Definitions and Tool Evaluation*, University of Minnesota.
- Alhomsi, H. (2012), *Intégration de règles “DfE” (Design for Environment) Pour La Conception de Produits, Process et Cycles de Vie Propres*, Université de Grenoble.
- Alonso Movilla, N. (2016), *Contribution Aux Methodes de Conception Pour La Fin de Vie : Prise En Compte Des Pratiques de Pretraitement de La Filiere DEEE (Dechets D ’ Equipements Electriques et Electroniques)*, Université Grenoble Alpes.
- Alonso Movilla, N. and Zwolinski, P. (2015), “Design for Recovery: Applying Multivariate Statistics to Define Groupings of French WEEE Pre-Treatment Operators”, *The 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)*, Milan - Italy.
- Alur, R., Courcoubetis, C. and Halbwachs, N. (1995), “The algorithmic analysis of hybrid systems”, *Theoretical Computer Science*, Vol. 138 No. 1, pp. 3–34.
- Alur, R., Courcoubetis, C., Henzinger, T. and Ho, P. (1993), “Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems”, *Hybrid Systems*, Vol. 138, pp. 209–229.
- Aras, N., Verter, V. and Boyaci, T. (2009), “Coordination and Priority Decisions in Hybrid Manufacturing/Remanufacturing Systems”, *Production and Operations Management*, Vol. 15 No. 4, pp. 528–543.
- Arena, U., Mastellone, M.L. and Perugini, F. (2003), “Life Cycle assessment of a plastic packaging recycling system”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 8 No. 2, pp. 92–98.
- Arnette, A., Brewer, B. and Choal, T. (2014), “Design for sustainability (DFS): the intersection of supply chain and environment”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 83, pp. 374–390.
- Ayres, R.. and Ayres, L.W. (2002), *A Handbook of Industrial Ecology*, Edward Elg., Edward Elg.
- Ayres, R.U. (1995), “Life cycle analysis: A critique”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 14 No. 3–4, pp. 199–223.
- Baas, L. (1998), “Cleaner production and industrial ecosystems, a Dutch experience”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 6 No. 3–4, pp. 189–197.

- Baghli, L. (1999), *Contribution À La Commande de La Machine Asynchrone, Utilisation de La Logique Floue, Des Réseaux de Neurones et Des Algorithmes Génétiques*, Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- Baines, T.S., Lightfoot, H.W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., Peppard, J., Roy, R., et al. (2007), "State-of-the-art in product-service systems", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221 No. 10, pp. 1543–1552.
- Balanca, F., Lemagnen, M., Pompidou, S. and Perry, N. (2014), "Development of a design for end-of-life approach in a strongly guided design process. Application to high-tech products.", *10th - Going Green, Care Innovation*, Vienne.
- Baldé, C., Wang, F., Kuehr, R. and Huisman, J. (2015), "The Global e-waste Monitor 2014, Institute for the Advanced Study of Sustainability (IAS) and Sustainable Cycles (SCYCLE)".
- Barbault, R. (2008), *Écologie Générale - 6ème Édition - Structure et Fonctionnement de La Biosphère: Structure et Fonctionnement de La Biosphère*, Dunod.
- Batis, S. (2013), *Commande D'une Classe de Systèmes Hybrides Par Automates Hybrides Rectangulaires*, Université de Grenoble.
- Bauer, T., Mandil, G., Naveaux, É. and Zwolinski, P. (2016), "Lifespan Extension for Environmental Benefits: A new Concept of Products with Several Distinct Usage Phases", *Procedia CIRP*, Elsevier, Vol. 47, pp. 430–435.
- Bauer, T., Zwolinski, P., Mandil, G. and Monnier, É. (2017), "Conception de batteries repurposées : Quels paramètres de conception et comment les définir ?", *15e Colloque National AIP-Priméca*, La Plagne, France.
- Bentaha, M.L. (2014), *Conception combinatoire des lignes de désassemblage sous incertitudes*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 16 October.
- Bentaha, M.L., Battaïa, O., Dolgui, A. and Hu, S.J. (2014), "Dealing with uncertainty in disassembly line design", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 63 No. 1, pp. 21–24.
- Bentaha, M.L., Voisin, A., Marangé, P., Dolgui, A. and Battaïa, O. (2016), "Prise en compte de l'état des produits pour la planification de leur désassemblage", *Journal Européen Des Systemes Automatisés*, Vol. 49 No. 4–5, pp. 579–605.
- Benyus, J.M. (2009), *Biomimicry*, William Morrow, New York.
- Benyus, J.M.. (2011), *Biomimétisme*, Rue de l'échiquier.
- Bergen, S.D., Bolton, S.M. and L. Fridley, J. (2001), "Design principles for ecological engineering", *Ecological Engineering*, Vol. 18 No. 2, pp. 201–210.
- Bertalanffy, L. von. (1980), *General System Theory: Foundations, Development, Applications*, Georg Braziller.
- Blanchart, A., Sere, G., Cherel, J. and Warot, G. (2017), "Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain", *Environnement*.
- Bouaziz, M.F. (2012), "Contribution à la modélisation Bayésienne de l'état de santé d'un système complexe: application à l'industrie du semi-conducteur", Université de Grenoble, 27 November.

- Boulanger, P. and Bréchet, T. (2003), “Une analyse comparative des classes de modèles”, *Modélisation et Aide À La Décision Pour Un Développement Durable, Action de Support PADD I, SSTC*.
- Bouriachi, F., Kechida, S. and Bencheriet, C. (2013), “Modélisation d’un Réseau du Trafic Urbain par Automate Hybride”, *International Conference on Systems and Processing Information*, Guelma (Algeria).
- Bousquet, F., Barreteau, O., Mullon, C. and Weber, J. (2013), “Modélisation d’accompagnement: systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables”, *Rendre Possible*, Editions Quæ.
- Brissaud, D. and Zwolinski, P. (2017), “The Scientific Challenges for a Sustainable Consumption and Production Scenario: The Circular Reuse of Materials for the Upgrading and Repurposing of Components”, *Procedia CIRP*, Elsevier, Vol. 61, pp. 663–666.
- Brostra, R. (2017), “Hongkong ploie sous les déchets électroniques - Libération”, *Libération*, 10 September.
- Buclet, N. (2005), “Concevoir une nouvelle relation à la consommation: l’économie de fonctionnalité”, *Série des Annales des Mines: Responsabilité et environnement*, pp. 57–66.
- Bufardi, A., Gheorghe, R., Kiritsis, D. and Xirouchakis, P. (2004), “Multicriteria decision-aid approach for product end-of-life alternative selection”, *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Group, Vol. 42 No. 16, pp. 3139–3157.
- Carter, T. and Keeler, A. (2008), “Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems.”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 87 No. 3, pp. 350–63.
- Castanié, S. (2013), *Matériaux Vitreux Auto-Cicatrisants Pour Applications Hautes Températures*, Lille 1, 7 October.
- Chaerul, M., Tanaka, M. and Shekdar, A. (2008), “A system dynamics approach for hospital waste management”, *Waste Management*, Vol. 28, pp. 442–449.
- Charter, M. and Gray, C. (2008), “Remanufacturing and product design”, *International Journal of Product Development*, Inderscience Publishers.
- Chertow, M. and Park, J. (2016), “Scholarship and Practice in Industrial Symbiosis: 1989–2014”, *Taking Stock of Industrial Ecology*, Springer International Publishing, pp. 87–116.
- Chertow, M.R. (2000), “INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy”, *Annual Review of Energy and the Environment*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, P.O. Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, Vol. 25 No. 1, pp. 313–337.
- Cocheteux, P. (2010), “Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels”, Université Henri Poincaré - Nancy I, 15 November.
- Cole, R.J. (2012), “Regenerative design and development: current theory and practice”, *Building Research & Information*, Routledge, Vol. 40 No. 1, pp. 1–6.
- Cole, R.J., Oliver, A. and Robinson, J. (2013), “Regenerative design, socio-ecological systems and co-evolution”, *Building Research & Information*, Routledge, Vol. 41 No.

- 2, pp. 237–247.
- Coulter, S. and Bras, B. (1998), “Designing for material separation: lessons from automotive recycling”, *Journal of Mechanical Design*.
- Damgaard, A., Riber, C., Fruergaard, T., Hulgaard, T. and Christensen, T.H. (2010), “Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration.”, *Waste Management (New York, N.Y.)*, Vol. 30 No. 7, pp. 1244–50.
- Dauta, A. (1982), “Conditions de développement du phytoplancton. Etude comparative du comportement de huit espèces en culture. II. Rôle des nutriments: assimilation et stockage”, *Annales de Limnologie-International Journal of*.
- Davet, P. (1996), “Vie microbienne du sol et production végétale”.
- Derbel, H. (2009), *Diagnostic À Base de Modèles Des Systèmes Temporisés et D’une Sous-Classe de Systèmes Dynamiques Hybrides*, Université de Grenoble.
- Desai, A. and Mital, A. (2017), “An interactive system framework to enable design for disassembly”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Emerald Publishing Limited, Vol. 28 No. 6, pp. 749–771.
- Devadula, S. and Chakrabarti, A. (2015), “Design strategies for Circular Economy”, *The 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)*, Milan - Italy.
- Diez, L., Marange, P. and Levrat, E. (2017), “Regeneration management tool for industrial ecosystem”, *20th IFAC World Congress*, Toulouse, France.
- Diez, L., Marangé, P. and Levrat, E. (2016), “Maintenance best way for meeting the challenge of regeneration”, *3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology*, Biarritz - France.
- Diez, L., Marangé, P., Mayer, F. and Levrat, E. (2015), “Maintenance as a Cornerstone for the Application of Regeneration Paradigm in Systems Lifecycle”, *Complex Systems Design & Management*, pp. 185–197.
- Dreyfus, G., Martinez, J. and Samuelides, M. (2002), *Réseaux de Neurones, Méthodologie et Applications*, Eyrolles.
- Dufrene, M., Zwolinski, P. and Brissaud, D. (2013), “An engineering platform to support a practical integrated eco-design methodology”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, CIRP, Vol. 62 No. 1, pp. 131–134.
- Duinker, P.N. and Greig, L.A. (2007), “Scenario analysis in environmental impact assessment: Improving explorations of the future”, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 27 No. 3, pp. 206–219.
- Ehrenfeld, J. and Gertler, N. (1997), “Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 1 No. 1, pp. 67–79.
- Ellen MacArthur Foundation. (2009), “Ellen MacArthur Foundation”, available at: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/>.
- Erkman, S. (2004), *Vers Une Écologie Industrielle*, ECLM.
- Fabre, P.M. and Winkler, W. (2010), *L’obsolescence Programmée, Symbole de La Société*

Du Gaspillage.

- Ferguson, R.S. and Lovell, S.T. (2013), "Permaculture for agroecology: design, movement, practice, and worldview. A review", *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 34 No. 2, pp. 251–274.
- Fiorèse, S. and Meinadier, J. (2012), *Découvrir et Comprendre L'ingénierie Système, CEPADUES*.
- Forrester, J.W. (1961), *Industrial Dynamics*, MIT Press.
- Foster, M., Isely, P., Standridge, C.R. and Hasan, M.M. (2014), "Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries", *Journal of Industrial Engineering and Management*.
- Foundation Ellen MacArthur. (2014), *Report Version 1, 2 & 3: Towards the Circular Economy*.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., et al. (2004), "The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp)", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 10 No. 1, pp. 3–9.
- Fronzel, M., Horbach, J. and Rennings, K. (2007), "End-of-pipe or cleaner production? An empirical comparison of environmental innovation decisions across OECD countries", *Business Strategy and the Environment*, Vol. 16 No. 8, pp. 571–584.
- Gaustad, G., Olivetti, E. and Kirchain, R. (2010), "Design for recycling", *Journal of Industrial Ecology*.
- Gelbmann, U. and Hammerl, B. (2015), "Integrative re-use systems as innovative business models for devising sustainable product–service-systems", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 97, pp. 50–60.
- Germani, M., Luzi, A., Mandolini, M. and Marconi, M. (2014), "End-of-Life Indices to Manage the Demanufacturing Phase during the Product Design Process", *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, Springer International Publishing, Cham, pp. 339–344.
- Giugliano, M., Cernuschi, S., Grosso, M. and Rigamonti, L. (2011), "Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment.", *Waste Management (New York, N.Y.)*, Vol. 31 No. 9–10, pp. 2092–101.
- Glavič, P. and Lukman, R. (2007), "Review of sustainability terms and their definitions", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15 No. 18, pp. 1875–1885.
- Go, T., Wahab, D. and Hishamuddin, H. (2015), "Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 95, pp. 16–29.
- Gobat, J., Aragno, M. and Matthey, W. (2010), "Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols".
- Godichaud, M. (2009), "Outils d'aide à la décision pour la sélection des filières de valorisation des produits de la déconstruction des systèmes en fin de vie : application au domaine aéronautique", Institut National Polytechnique de Toulouse, 22 April, available at: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000799/> (accessed 31 August 2015).

- Godichaud, M., Tchangani, A., Pérès, F. and Iung, B. (2012), “Sustainable management of end-of-life systems”, *Production Planning & Control*, Taylor & Francis Group.
- Goggin, K., Reay, E. and Browne, J. (2000), “Modelling end-of-life product recovery chains - a case study”, *Production Planning & Control*, Taylor & Francis Group, Vol. 11 No. 2, pp. 187–196.
- Golroudbary, S. and Zahraee, S. (2015), “System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 53, pp. 88–102.
- Goodall, P., Rosamond, E. and Harding, J. (2014), “A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 81, pp. 1–15.
- Govindan, K., Soleimani, H. and Kannan, D. (2014), “Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 240 No. 3, pp. 603–626.
- Guide, V.D.R. (2000), “Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs”, *Journal of Operations Management*, Vol. 18 No. 4, pp. 467–483.
- Guide, V.D.R., Harrison, T.P. and Wassenhove, L.N. Van. (2003), “The Challenge of Closed-Loop Supply Chains”, *Interfaces*, INFORMS.
- Guide, V.D.R. and Van Wassenhove, L.N. (2009), “OR FORUM—The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research”, *Operations Research*, INFORMS, Vol. 57 No. 1, pp. 10–18.
- Gust, D. and Moore, T.A. (1989), “Mimicking photosynthesis.”, *Science (New York, N.Y.)*, Vol. 244 No. 4900, pp. 35–41.
- Gust, D., Moore, T.A. and Moore, A.L. (2012), “Realizing artificial photosynthesis”, *Faraday Discuss.*, The Royal Society of Chemistry, Vol. 155, pp. 9–26.
- Hallouli, K. and Likforman-Sulem, L. (2004), “Reconnaissance de caractères manuscrits par Réseaux Bayésiens Dynamiques”, *Conférence Internationale Francophone Sur l’Ecrit et Le Document*.
- Hasani, A., Zegordi, S.H. and Nikbakhsh, E. (2012), “Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty”, *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Group, Vol. 50 No. 16, pp. 4649–4669.
- Hassine, H. (2015), *Modélisation, Simulation et Optimisation Pour L’éco-Fabrication*, Ecole Centrale Paris.
- Hatcher, G., Ijomah, W. and Windmill, J. (2011), “Design for remanufacture: a literature review and future research needs”, *Journal of Cleaner Production*.
- Henzinger, T., Ho, P. and Wong-Toi, H. (1997), “HyTech: A model checker for hybrid systems”, in Springer Berlin Heidelberg (Ed.), *International Conference on Computer Aided Verification*, pp. 460–463.
- Henzinger, T. and Majumdar, R. (2000), “Symbolic model checking for rectangular hybrid systems”, in Springer Berlin Heidelberg (Ed.), *International Conference on Tools and*

- Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*, pp. 142–156.
- Hildebrandt, J., Bezama, A. and Thrän, D. (2017), “Cascade use indicators for selected biopolymers: Are we aiming for the right solutions in the design for recycling of bio-based polymers?”, *Waste Management & Research*, SAGE PublicationsSage UK: London, England, Vol. 35 No. 4, pp. 367–378.
- Hoang, A., Do, P. and Iung, B. (2017), “Energy efficiency performance-based prognostics for aided maintenance decision-making: Application to a manufacturing platform”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 142, pp. 2838–2857.
- Holma, A., Koponen, K., Antikainen, R., Lardon, L., Leskinen, P. and Roux, P. (2013), “Current limits of life cycle assessment framework in evaluating environmental sustainability – case of two evolving biofuel technologies”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 54, pp. 215–228.
- Hu, Y., Liu, S. and Zhang, H. (2015), “Remanufacturing Decision Based on RUL Assessment”, *Procedia CIRP*.
- Huang, I.B., Keisler, J. and Linkov, I. (2011), “Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends”, *Science of The Total Environment*, Elsevier, Vol. 409 No. 19, pp. 3578–3594.
- Ijomah, W. and McMahon, C. (2007), “Development of design for remanufacturing guidelines to support sustainable manufacturing”, *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*.
- Institut de l'économie circulaire. (2013), “Institut de l'économie circulaire”, available at: <http://www.institut-economie-circulaire.fr>.
- ISO 13306. (2010), “Maintenance Terminology”, Association Française de Normalisation.
- Issa, I.I., Pigosso, D.C.A., McAloone, T.C. and Rozenfeld, H. (2015), “Leading product-related environmental performance indicators: a selection guide and database”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 108 No. Part A, pp. 321–330.
- Iung, B. and Levrat, E. (2014), “Advanced Maintenance Services for Promoting Sustainability”, *Procedia CIRP*, Vol. 22, pp. 15–22.
- Johnson, T. and Kerzhner, A. (2012), “Integrating models and simulations of continuous dynamics into SysML”, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 12 No. 1.
- Jolliet, O., Saadé, M. and Crettaz, P. (2010), *Analyse Du Cycle de Vie: Comprendre et Réaliser Un Écobilan*, PPUR Presses polytechniques.
- Karmperis, A.C., Aravossis, K., Tatsiopoulos, I.P. and Sotirchos, A. (2013), “Decision support models for solid waste management: review and game-theoretic approaches.”, *Waste Management (New York, N.Y.)*, Vol. 33 No. 5, pp. 1290–301.
- Karmperis, A.C., Sotirchos, A., Aravossis, K. and Tatsiopoulos, I.P. (2012), “Waste management project's alternatives: A risk-based multi-criteria assessment (RBMCA) approach.”, *Waste Management (New York, N.Y.)*, Vol. 32 No. 1, pp. 194–212.
- Kerbrat, O., Bourhis, F. Le, Ponche, R., Mognol, P. and Hascoët, J.-Y. (2013), “Evaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication”, pp. 1–6.
- Kiritsis, D. (2011), “Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of

- things”, *Computer-Aided Design*, available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448510000485> (accessed 12 February 2016).
- Kjaerheim, G. (2005), “Cleaner production and sustainability”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 13 No. 4, pp. 329–339.
- Kormondy, E.J. (1969), *Concepts of Ecology*, Prentice-Hall.
- Kriwet, A., Zussman, E. and Seliger, G. (1995), “Systematic integration of design-for-recycling into product design”, *International Journal of Production Economics*, Elsevier, Vol. 38 No. 1, pp. 15–22.
- Kubler, S. and Derigent, W. (2014), “Method for embedding context-sensitive information on ‘communicating textiles’ via Fuzzy AHP”, *Journal of Intelligent ...*, available at: <http://content.iospress.com/articles/journal-of-intelligent-and-fuzzy-systems/ifs753> (accessed 12 February 2016).
- Kuo, T. (1997), “A disassembly model for end-of-life products recycling”.
- Lacoste, R. and Robiolle, M. (2011), *L'écoconception En Électronique*, Dunod.
- Van Lamsweerde, A. (2000), “Formal specification: a roadmap”, *ACM*, pp. 147–159.
- Lara-Rosano, F. (2015), “Petri Net Models of Purposeful Complex Dynamic Systems”, in Springer International Publishing (Ed.), *ISCS 2014: Interdisciplinary Symposium on Complex Systems*, pp. 183–191.
- Léonard, A. (2010), *The Story of Electronics: Annotated Script*.
- Li, J., Liu, L., Zhao, N., Yu, K. and Zheng, L. (2013), “Regional or global WEEE recycling. Where to go?”, *Waste Management*.
- Linkov, I., Satterstrom, F.K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T. and Ferguson, E. (2006), “From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: recent developments and applications.”, *Environment International*, Vol. 32 No. 8, pp. 1072–93.
- Llorach-Massana, P., Farreny, R. and Oliver-Solà, J. (2015), “Are Cradle to Cradle certified products environmentally preferable? Analysis from an LCA approach”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 93, pp. 243–250.
- Lofthouse, V. and Bhamra, T. (2005), “End of life decisions: a design guide”.
- LOI 2015-992. (2015), *LOI N° 2015-992 Relative À La Transition Énergétique Pour La Croissance Verte*.
- LOI 2015-992 - Am.798. (2016), *Loi Sur La Transition Énergétique - Amendement 798 - Relative À L'application de L'article L224-67 Du Code de La Consommation - Entrée En Vigueur Le 1er Janvier 2017*.
- Lombardi, D.R., Lyons, D., Shi, H. and Agarwal, A. (2012), “Industrial Symbiosis”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 16 No. 1, pp. 2–7.
- Lombardi, L., Carnevale, E. and Corti, A. (2006), “Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill”, *Energy*, Vol. 31 No. 15, pp. 3208–3219.
- Lopes Silva, D.A., Delai, I., Soares de Castro, M.A. and Ometto, A.R. (2013), “Quality tools applied to Cleaner Production programs: a first approach toward a new methodology”,

- Journal of Cleaner Production*, Vol. 47, pp. 174–187.
- Lund, R.T. and Mundial, B. (1984), *Remanufacturing: The Experience of the United States and Implications for Developing Countries*, *World Bank Technical Paper*, Vol. 31, World Bank.
- Luttropp, C. and Lagerstedt, J. (2006), “EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development”, *Journal of Cleaner Production*.
- Ma, Y.-S., Jun, H.-B., Kim, H.-W. and Lee, D.-H. (2011), “Disassembly process planning algorithms for end-of-life product recovery and environmentally conscious disposal”, *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Group, Vol. 49 No. 23, pp. 7007–7027.
- Mang, P. and Reed, B. (2012), “Designing from place: a regenerative framework and methodology”, *Building Research & Information*, E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, Vol. 40 No. 1, pp. 23–38.
- Mang, P. and Reed, B. (2013), “Regenerative Development and Design”, *Sustainable Built Environments*, Springer New York, New York, NY, pp. 478–501.
- Mcaloone, T.C. and Andreasen, M.M. (2002), “DEFINING PRODUCT SERVICE SYSTEMS”, *13th Symposium on Design for X*, Neukirchen/Erlangen, Germany.
- McDonough, W. and Braungart, M. (2010), *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, Farrar, Straus and Giroux.
- McDonough, W. and Braungart, M. (2012), *Cradle to Cradle: Créer et Recycler À L’infini*, Alternatives éditions.
- McDonough Braungart Design Chemistry (MBDC). (2013), *C2C Certified: Material Health Methodology*.
- McManus, B. (2010), “An Integral Framework for Permaculture”, *Journal of Sustainable Development*, Vol. 3 No. 3, p. p162.
- Medina-Oliva, G. (2011), *Modélisation Conjointe Des Connaissances Multi-Points de Vue D’un Système Industriel et de Son Système de Soutien Pour L’évaluation Des Stratégies de Maintenance*, Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Ministère du Développement durable. (2016), “Ministère du Développement durable”, available at: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>.
- Morrissey, A.J. and Browne, J. (2004), “Waste management models and their application to sustainable waste management.”, *Waste Management (New York, N.Y.)*, Vol. 24 No. 3, pp. 297–308.
- Muckstadt, J.A. (1973), “A Model for a Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System”, *Management Science*, INFORMS, Vol. 20 No. 4–part-i, pp. 472–481.
- Murphy, K. (2002), *Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning*, University of California, Berkeley.
- Nadoveza, D., Koukias, A., Karakoyun, F. and Kiritsis, D. (2013), “A Concept for Graph-Based LCA Analysis Tool”, *20th Advances in Production Management Systems (APMS)*, State College, PA, United States, pp. 410–417.

- Nations Unies. (1992), “Déclaration de Rio sur l’environnement et le développement durable”, p. 4.
- Nielsen, S.N. (2007), “What has modern ecosystem theory to offer to cleaner production, industrial ecology and society? The views of an ecologist”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15 No. 17, pp. 1639–1653.
- Nocera, D.G. (2012), “The artificial leaf.”, *Accounts of Chemical Research*, American Chemical Society, Vol. 45 No. 5, pp. 767–76.
- Nzukam, C.C., Voisin, A., Levrat, E., Sauter, D. and Iung, B. (2017), “A dynamic maintenance decision approach based on maintenance action grouping for HVAC maintenance costs savings in non-residential buildings”.
- Pati, R., Vrat, P. and Kumar, P. (2008), “A goal programming model for paper recycling system☆”, *Omega*, Vol. 36 No. 3, pp. 405–417.
- Pires, S.D.P., Sénéchal, O., Deschamps, F., Rocha Loures, E.F. and Perroni, M.G. (2016), “Industrial maintenance for sustainable performance : a systematic literature review Industrial maintenance for sustainable performance : a systematic literature review”, *The 23rd International Conference on Production Research*, No. November.
- Planton, S., Bopp, L., Brun, E., Cattiaux, J., Chauvin, F., Chevallier, M., Ciais, P., et al. (2015), “Evolution du climat depuis 1850”, *La Météorologie*, Vol. 8 No. 88, p. 48.
- Plaut, J.M., Dunbar, B., Wackerman, A. and Hodgins, S. (2011), “Regenerative design: the LENSES Framework for buildings and communities”, *Building Research & Information*, Routledge.
- du Plessis, C. (2012), “Towards a regenerative paradigm for the built environment”, *Building Research & Information*, Routledge, Vol. 40 No. 1, pp. 7–22.
- Pochat, S. Le. (2005), *Intégration de L'éco-Conception Dans Les PME: Proposition D'une Méthode D'appropriation de Savoir-Faire Pour La Conception Environnementale Des Produits*, Paris, ENSAM.
- Pokharel, S. and Mutha, A. (2009), “Perspectives in reverse logistics: A review”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53 No. 4, pp. 175–182.
- Presley, A., Meade, L. and Sarkis, J. (2007), “A strategic sustainability justification methodology for organizational decisions: a reverse logistics illustration”, *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Group, Vol. 45 No. 18–19, pp. 4595–4620.
- Pyster, A., Olwell, D., Anthony, J., Enck, S., Hutchison, N. and Squires, A. (2011), *A Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) Version 1.9*, edited by Technology, S.I. of, Hoboken.
- Radzicki, M. (2009), “System dynamics and its contribution to economics and economic modeling”, in Springer New York (Ed.), *Complex Systems in Finance and Econometrics*, pp. 727–737.
- Ramade, F. (2009), “Eléments d'écologie: Ecologie fondamentale-4e édition”.
- Ramani, K. (2010), “Integrated sustainable life cycle design: a review”, *Journal of Mechanical Design*.
- Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013), “A new multi-objective

- stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37 No. 1–2, pp. 328–344.
- Rey-coquais, E.M.E. (2012), *La Perception Du SAV Par Le Consommateur Dans Le Domaine Du Gros Electromenager*.
- Rousseaux, P., Gremy-Gros, C., Bonnin, M., Henriel-Ricordel, C., Bernard, P., Floury, L., Staigre, G., et al. (2017), “Eco-tool-seeker’A new and unique business guide for choosing ecodesign tools”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 151, pp. 546–577.
- Saxena, A. (2010), “Prognostics the science of prediction”, *Annual Conference of the PHM Society (PHM2010)*, Portland, p. In Tutorial.
- Schögggl, J.-P., Baumgartner, R.J. and Hofer, D. (2017), “Improving sustainability performance in early phases of product design: A checklist for sustainable product development tested in the automotive industry”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 140, pp. 1602–1617.
- Schwarze, A., Buntins, M., Schicke-Uffmann, J. and Goltz, U. (2013), “Modelling driving behaviour using hybrid automata”, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 7 No. 2, pp. 251–256.
- Sodhi, M.S. and Reimer, B. (2001), “Models for recycling electronics end-of-life products”, *OR Spektrum*, Vol. 23 No. 1, pp. 97–115.
- Song, S., Liu, M., Ke, Q. and Huang, H. (2015), “Proactive remanufacturing timing determination method based on residual strength”, *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, Vol. 53 No. 17, pp. 5193–5206.
- Souza, G.C. (2013), “Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research*”, *Decision Sciences*, Vol. 44 No. 1, pp. 7–38.
- Stahel, W.R. (2005), “The Functional Economy: Cultural and Organizational Change”, *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 1 No. 2, p. 121.
- Sterman, J. (2000), *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Irwin/McGraw-Hill.
- Stindt, D. and Sahamie, R. (2012), “Review of research on closed loop supply chain management in the process industry”, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 26 No. 1–2, pp. 268–293.
- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y. and Yu, X. (2013), “A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 42, pp. 215–227.
- Sundin, E. (2004), “Product and process design for successful remanufacturing”.
- Svec, P., Berkebile, R. and Todd, J.A. (2012), “REGEN: toward a tool for regenerative thinking”, *Building Research & Information*, Routledge, Vol. 40 No. 1, pp. 81–94.
- Takata, S. (2013), “Maintenance-centered Circular Manufacturing”, *Procedia CIRP*, Vol. 11, pp. 23–31.
- Tangsubkul, N., Beavis, P., Moore, S.J., Lundie, S. and Waite, T.D. (2005), “Life Cycle Assessment of Water Recycling Technology”, *Water Resources Management*, Vol. 19 No. 5, pp. 521–537.

- Tanskanen, P. (2013), "Management and recycling of electronic waste", *Acta Materialia*.
- Tawada, M. and Sahashi, T. (2017), "Product Design for Recycling and Recycling Industry", Springer, Singapore, pp. 447–459.
- Thomas, E. (2009), *Contribution À La Prise de Décision Dynamique En Maintenance Prévisionnelle Par Formalisation D'un Principe D'opportunité.*, Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1.
- Toohey, K.S., Sottos, N.R., Lewis, J.A., Moore, J.S. and White, S.R. (2007), "Self-healing materials with microvascular networks.", *Nature Materials*, Vol. 6 No. 8, pp. 581–5.
- Touzet, C. (1992), "les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme".
- Tudela, A., Akiki, N. and Cisternas, R. (2006), "Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 40 No. 5, pp. 414–423.
- Tyl, B. (2011), *L'apport de La Créativité Dans Les Processus D'éco-Innovation - Proposition de L'outil EcoASIT Pour Favoriser L'éco-Idéation de Systèmes Durables*, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.
- Tyl, B., Allais, R. and Gobert, J. (2015), "Towards synergies between local repairers, citizens, designers, and public actors: the REVALUE project", *Global Cleaner Production & Sustainable Consumption Conference*, Stiges - Spain.
- Vallet, F., Eynard, B., Millet, D., Mahut, S.G., Tyl, B. and Bertoluci, G. (2013), "Using eco-design tools: An overview of experts' practices", *Design Studies*, Vol. 34 No. 3, pp. 345–377.
- Vasantha, G.V.A., Roy, R., Lelah, A. and Brissaud, D. (2012), "A review of product–service systems design methodologies", *Journal of Engineering Design*, Taylor & Francis, Vol. 23 No. 9, pp. 635–659.
- Vincent, F. (1991), "Contribution à l'étude du fonctionnement d'une décharge. Modélisation du comportement hydrodynamique et biologique d'un déchet-type".
- Voisin, A., Levrat, E., Cocheteux, P. and Iung, B. (2010), "Generic prognosis model for proactive maintenance decision support: application to pre-industrial e-maintenance test bed", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 21, pp. 177–193.
- WCED. (1987), *World Commission on Environment and Development - Our Common Future*.
- Weber, P. and Simon, C. (2015), "Méthode de modélisation par Réseaux Bayésien de la fiabilité d'un système multi-états", *11ème Congrès International Pluridisciplinaire En Qualité, Sécurité de Fonctionnement et Développement Durable*.
- Webster, K. (2013), "What Might We Say about a Circular Economy? Some Temptations to Avoid if Possible", *World Futures*, Taylor & Francis Group.
- Wenzel, H., Hauschild, M. and Alting, L. (2000), "Environmental Assessment of Products: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development".
- White, S.R., Sottos, N.R., Geubelle, P.H., Moore, J.S., Kessler, M.R., Sriram, S.R., Brown, E.N., et al. (2001), "Autonomic healing of polymer composites.", *Nature*, Macmillan Magazines Ltd., Vol. 409 No. 6822, pp. 794–7.

- Wu, Z. and Xu, J. (2013), “Predicting and optimization of energy consumption using system dynamics-fuzzy multiple objective programming in world heritage areas”, *Energy*, Vol. 19–31.
- WWF. (2016), *Planète Vivante*.
- Yune, J.H., Tian, J., Liu, W., Chen, L. and Descamps-Large, C. (2016), “Greening Chinese chemical industrial park by implementing industrial ecology strategies: A case study”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 112, pp. 54–64.
- Zemouri, R. (2003), *Contribution À La Surveillance Des Systèmes de Production À L’aide Des Réseaux de Neurones Dynamiques: Application À La E-Maintenance*, Université de Franche-Comté.
- Zeng, S.X., Meng, X.H., Yin, H.T., Tam, C.M. and Sun, L. (2010), “Impact of cleaner production on business performance”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18 No. 10–11, pp. 975–983.
- Zhang, L.Z. (2006), “Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures”, *Energy*, Vol. 31 No. 8–9, pp. 1228–1242.
- Zimmermann, E., Haouzi, H., Thomas, P., Pannequin, R., Noyel, M. and Thomas, A. (2017), “A case study of an Intelligent Manufacturing Control based on multi-agents’ system to deal with batching and sequencing on rework context”.
- Ziout, A., Azab, A. and Atwan, M. (2014), “A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 65, pp. 497–516.

Annexes

Annexe – Chapitre 1

Extrait de principes énoncés dans la déclaration de Rio sur l'environnement et le développement (Nations Unies, 1992)

Principe 1 : Les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Ils ont droit à une vie saine et productive en harmonie avec la nature.

Principe 3 : Le droit au développement doit être réalisé de façon à satisfaire équitablement les besoins relatifs au développement et à l'environnement des générations présentes et futures.

Principe 4 : Pour parvenir à un développement durable, la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement et ne peut être considérée isolément.

Principe 7 : Les Etats doivent coopérer dans un esprit de partenariat mondial en vue de conserver, de protéger et de rétablir la santé et l'intégrité de l'écosystème terrestre.

Principe 8 : Les Etats devraient réduire et éliminer les modes de production et de consommation non viables et promouvoir des politiques démographiques appropriées.

Principe 17 : Une étude d'impact sur l'environnement, en tant qu'instrument national, doit être entreprise dans le cas des activités envisagées qui risquent d'avoir des effets nocifs importants sur l'environnement.

Principe 22 : Les populations et communautés autochtones et les autres collectivités locales ont un rôle vital à jouer dans la gestion de l'environnement et le développement du fait de leurs connaissances du milieu et de leurs pratiques traditionnelles.

Annexe – Chapitre 3

Evolution du produit au sein des étapes de remise en état et de requalification

Remise en état

Le remise en état (Figure A3.81) commence dès que le diagnostic de décomposition est terminé (Équation 3.8), et se termine lorsque toutes les actions de remise en état ont été réalisées (Équation 3.9), permettant de passer à l'activité de requalification (Équation 3.10).

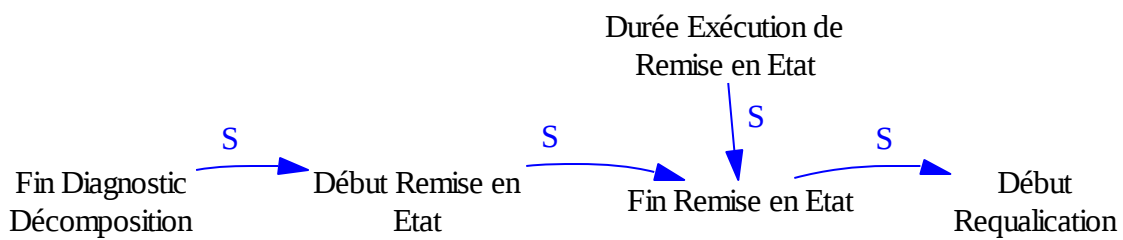


Figure A3.81 - Succession des étapes de remise en état

Équation A3.52

$$\text{Début Remise en Etat} = \begin{cases} 1, & \text{Fin Décomposition} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation A3.53

Fin Remise en Etat

$$= \text{DELAY}(\text{Début Remise en Etat}, \text{Durée Exécution Remise en Etat}, \text{Début Remise en Etat})$$

Équation A3.54

$$\text{Début Requalification} = \begin{cases} 1, & \text{Fin Remise en Etat} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Requalification

La requalification (Figure A3.82) commence dès que l'activité de remise en état est terminée (Équation 3.10) et se termine lorsque toutes les actions de requalification (caractérisation du produit_nutriment) ont été réalisées (Équation A3.55), permettant de clore la phase de régénération du produit_déchet (Équation A3.56).

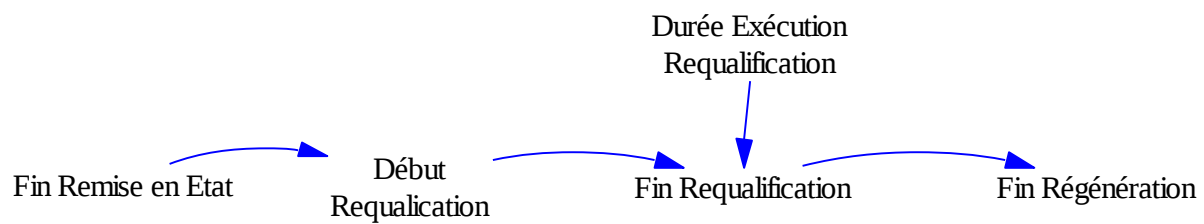


Figure A3.82 - Succession des étapes de requalification

Équation A3.55

Fin Requalification

= DELAY(Début Requalification, Durée Exécution Requalification, Début Requalification)

Équation A3.56

$$\text{Début Diagnostic 2} = \begin{cases} 1, & \text{Fin Requalification} = 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Annexes – Chapitre 4

I. Extrait des modèles réalisées et utilisées pour la politique 2 sur le flux tiré

Dans cette partie, seuls les modèles se rapportant au scénario 3 sont présentés. Pour mettre en équations ces modèles, il faut se référer à la partie III du Chapitre 4.

Afin de se repérer plus facilement, nous reprenons la même structure de plan que celle du chapitre 4.

III. 1. Modélisation du cycle de vie du produit

1.1. Evolution du produit dans les phases de vie

1.1.1. Passage d'une phase de vie à une autre

Dans le cas du scénario 3, le lave-linge passe de la phase d'utilisation à la phase de régénération selon 2 conditions (Figure A4.83) :

- La date maximale d'utilisation fixée par l'utilisateur est atteinte (encadré vert)
- La date minimale d'utilisation fixée par l'utilisateur est atteinte, et le seuil de fiabilité du lave-linge est passé en dessous de 96% (encadré orange).

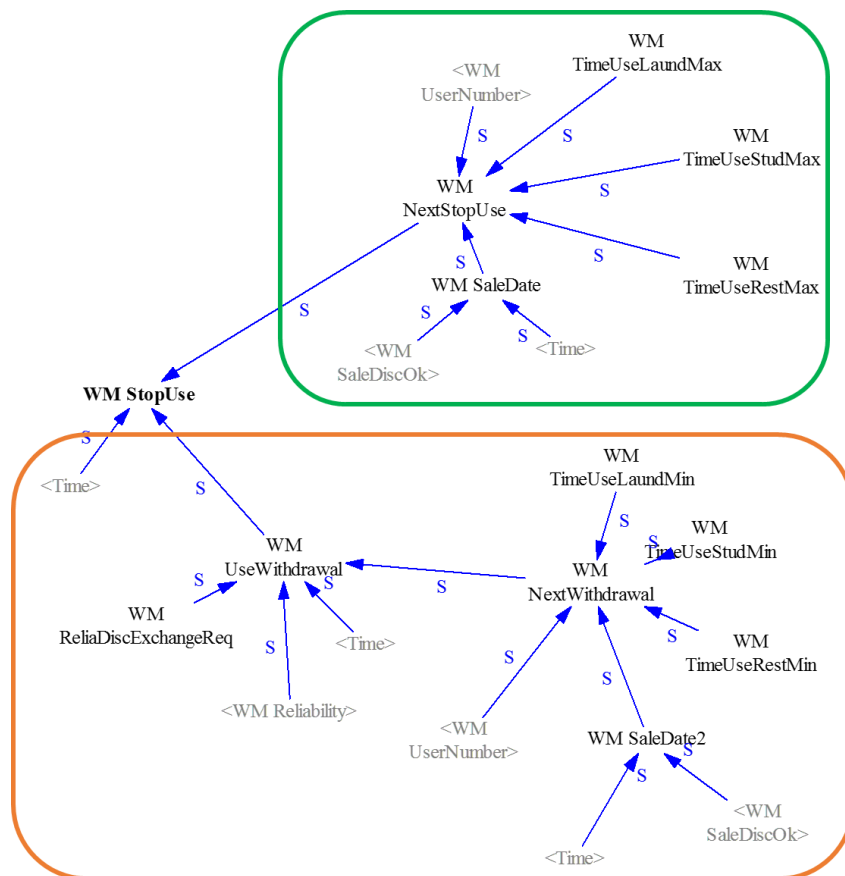


Figure A4.83 - Conditions d'arrêt d'exploitation du lave-linge dans le cas du scénario 3

Modélisation du comportement des sous-ensembles pour faire évoluer le lave-linge au sein des phases de vie

Les modèles présentés ci-après permettent de faire évoluer les modèles proposés pour notre étude et portent sur le lave-linge, notamment quant à la gestion des défaillances des sous-ensembles.

Visualisation des sous-ensembles présents dans le lave-linge

Un sous-ensemble ne pouvant être présent qu'une seule fois dans le lave-linge à un moment donné, il est nécessaire de déterminer quelle électrovanne ou carte électronique de commande est présente dans le lave-linge (Figure A4.84).

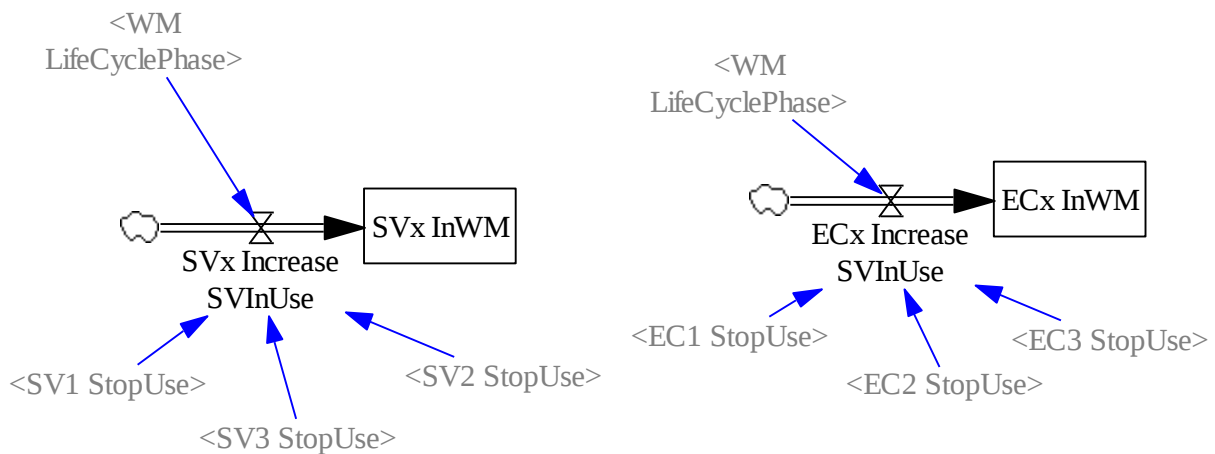


Figure A4.84 – Visualisation de l'électrovanne et de la carte Electronique de Commande présentes dans le lave-linge

Modélisation des dates de défaillances pour les électrovannes (SV) et les cartes électroniques de commande (EC)

La (Figure A4.85) permet de sélectionner, au début de chaque simulation, la date à laquelle chaque électrovanne tombera en panne (date sélectionnée aléatoirement entre les bornes données dans le chapitre 4). Les dates de défaillances des électrovannes n°2 et n°3 dépendent de la date de défaillances de l'électrovanne qui la précède. Le même modèle est réalisé pour les cartes électroniques de commande.

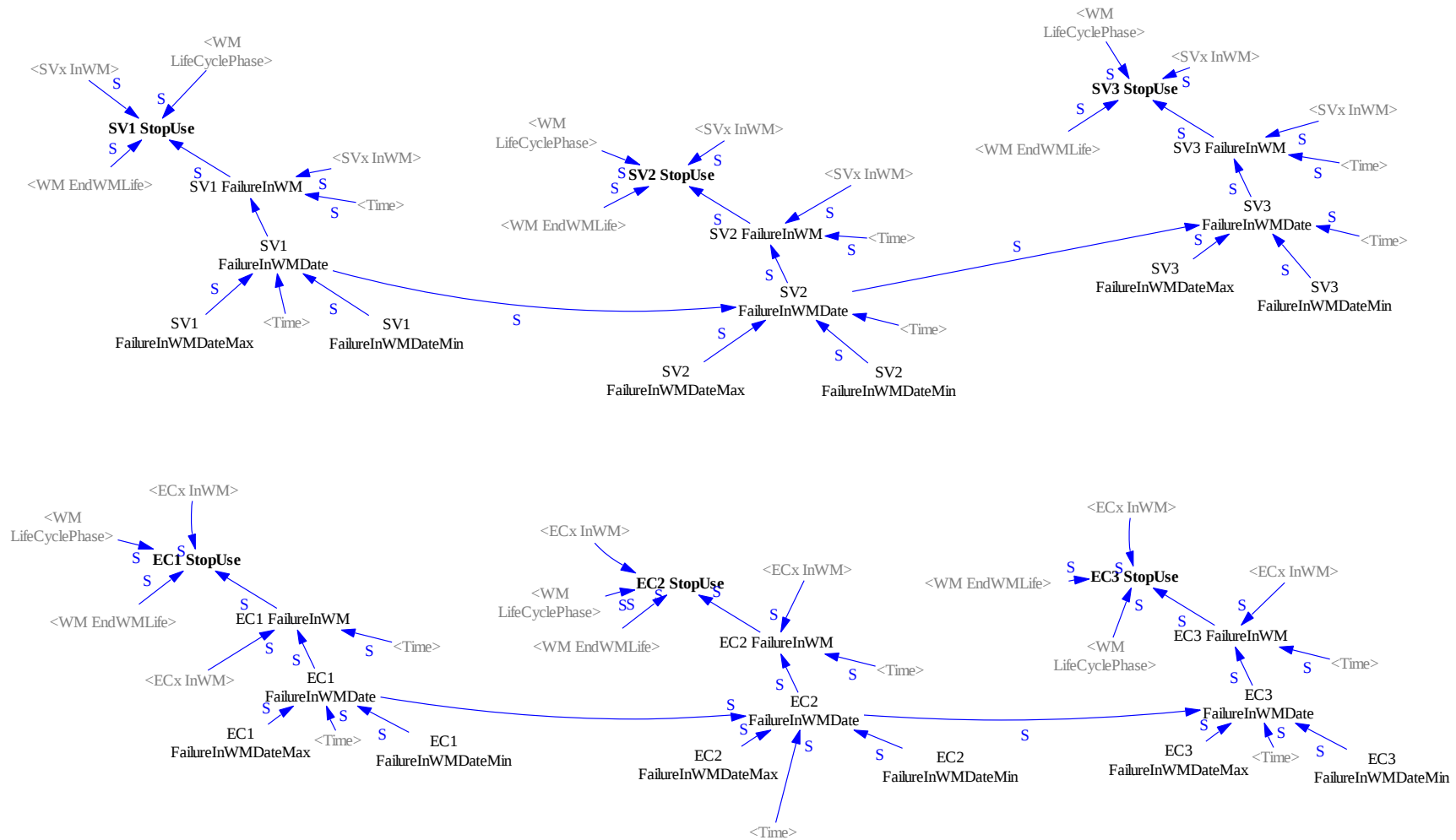


Figure A4.85 - Modélisation des dates de défaillances sur les électrovannes (SV) et les cartes électroniques de commande (EC)

1.1.2. Activités de régénération

La Figure A4.86 présente le modèle complet des activités du processus de déconnexion vu de manière parcellaire dans le chapitre 4.

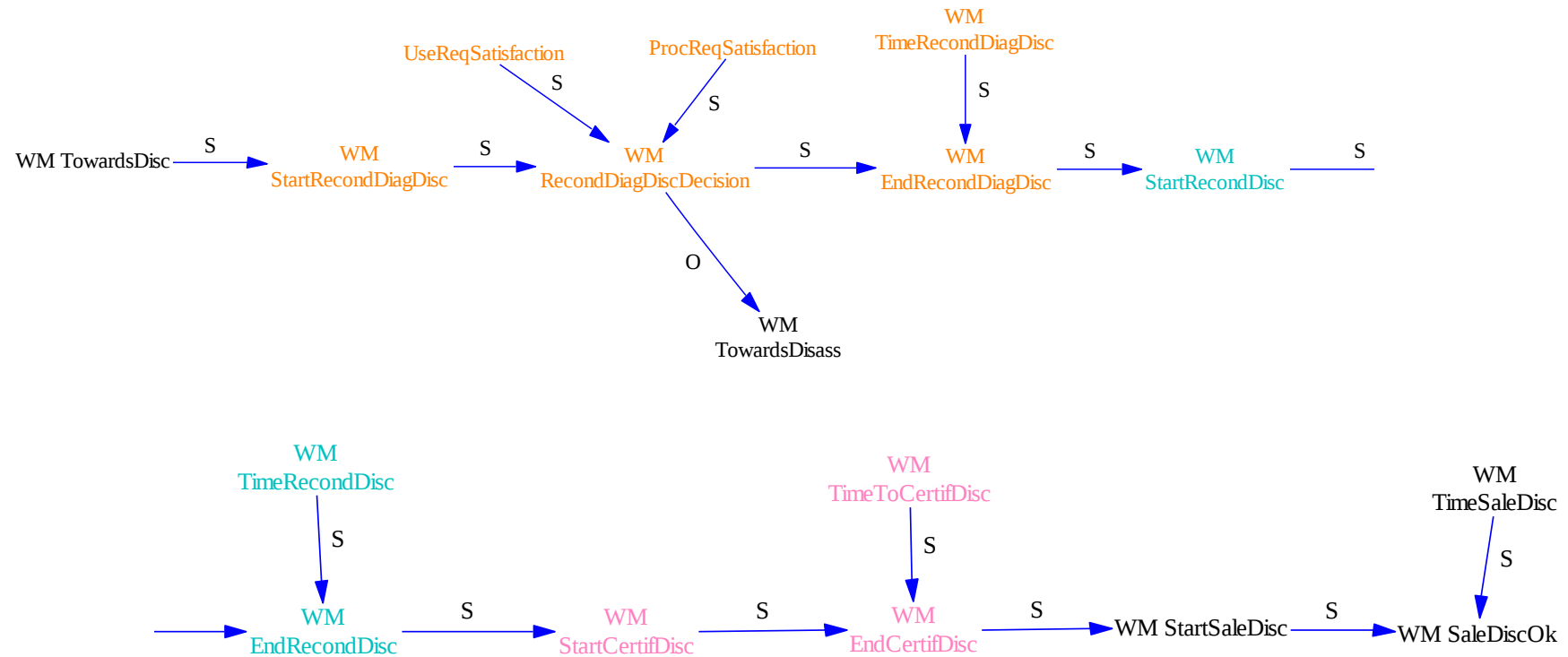


Figure A4.86 - Modèle complet des activités de régénération

Evaluation de la durée de remise en état du lave-linge_déchets

La Figure A4.87 permet d'estimer la durée de remise en état d'un lave-linges_déchets selon ses classes d'aspect physique (encadré orange) et d'état technique (encadré vert), et la classe de sortie souhaitée pour le lave-linge_nutriment.

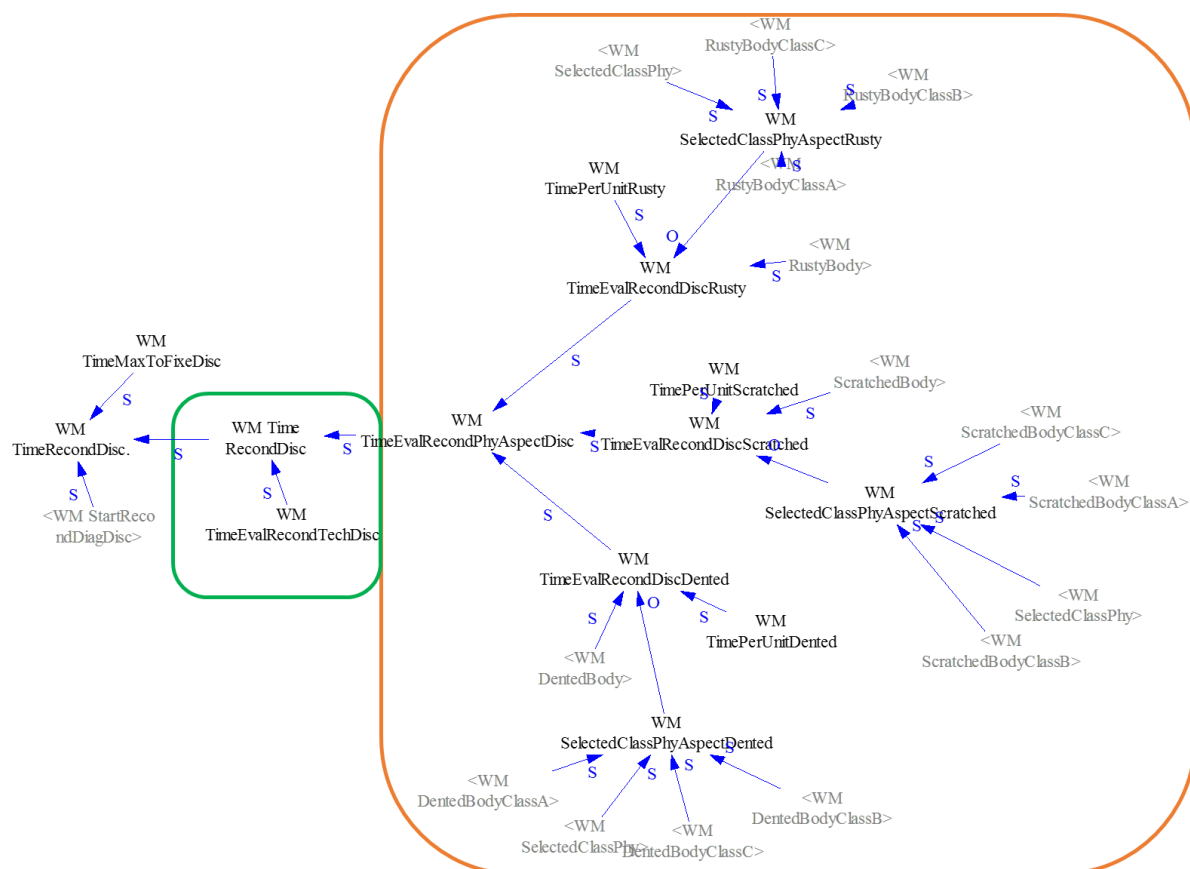


Figure A4.87 - Estimation de la durée de la phase de remise en état selon les classes satisfaites par le produit_déchets et de la classe du produit_nutriment souhaitée

Modélisation de la caractérisation de l'état technique

L'activité de requalification permet de caractériser l'état de santé du produit_nutriment en fonction de la caractérisation de l'aspect physique (vu dans le chapitre 4) et de l'état technique (Figure A4.88).

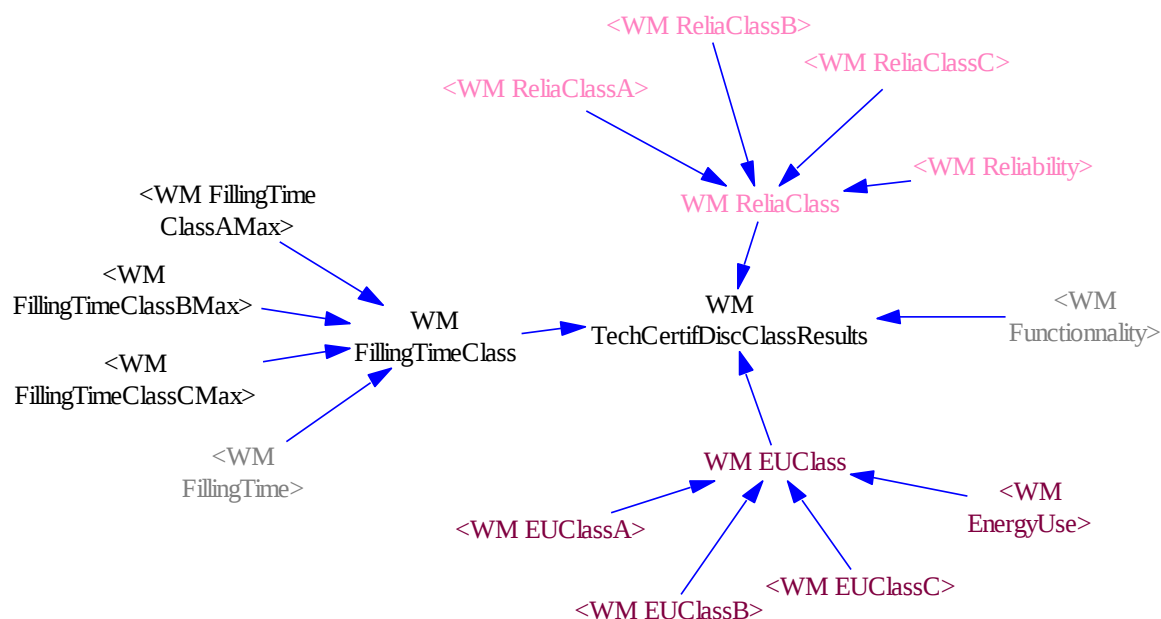


Figure A4.88 - Caractérisation de l'état technique durant la phase de requalification
(Relia = Fiabilité ; EU = Consommation Energétique ; FillingTime = Temps de remplissage de la cuve
(électrovanne))

1.2. Evolution de l'état de santé du produit

Aspect Physique du lave-linge

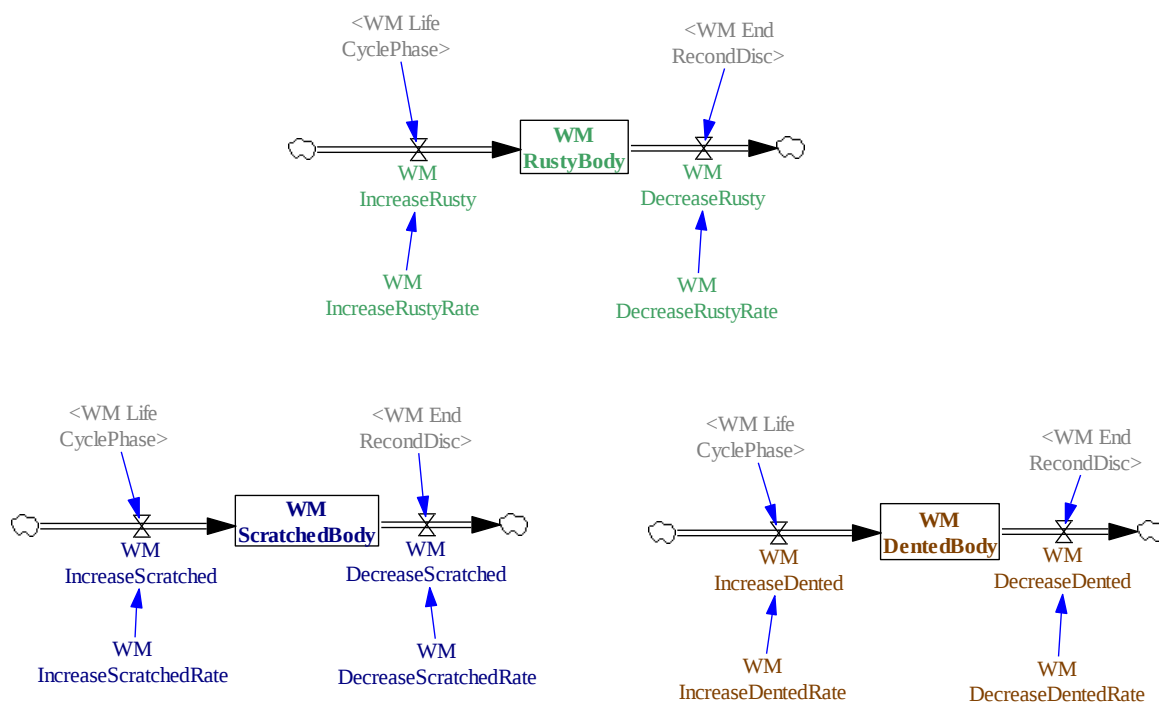


Figure A4.89 - Modélisation du comportement des variables de rouille, de rayures et de bosses sur le lave-linge

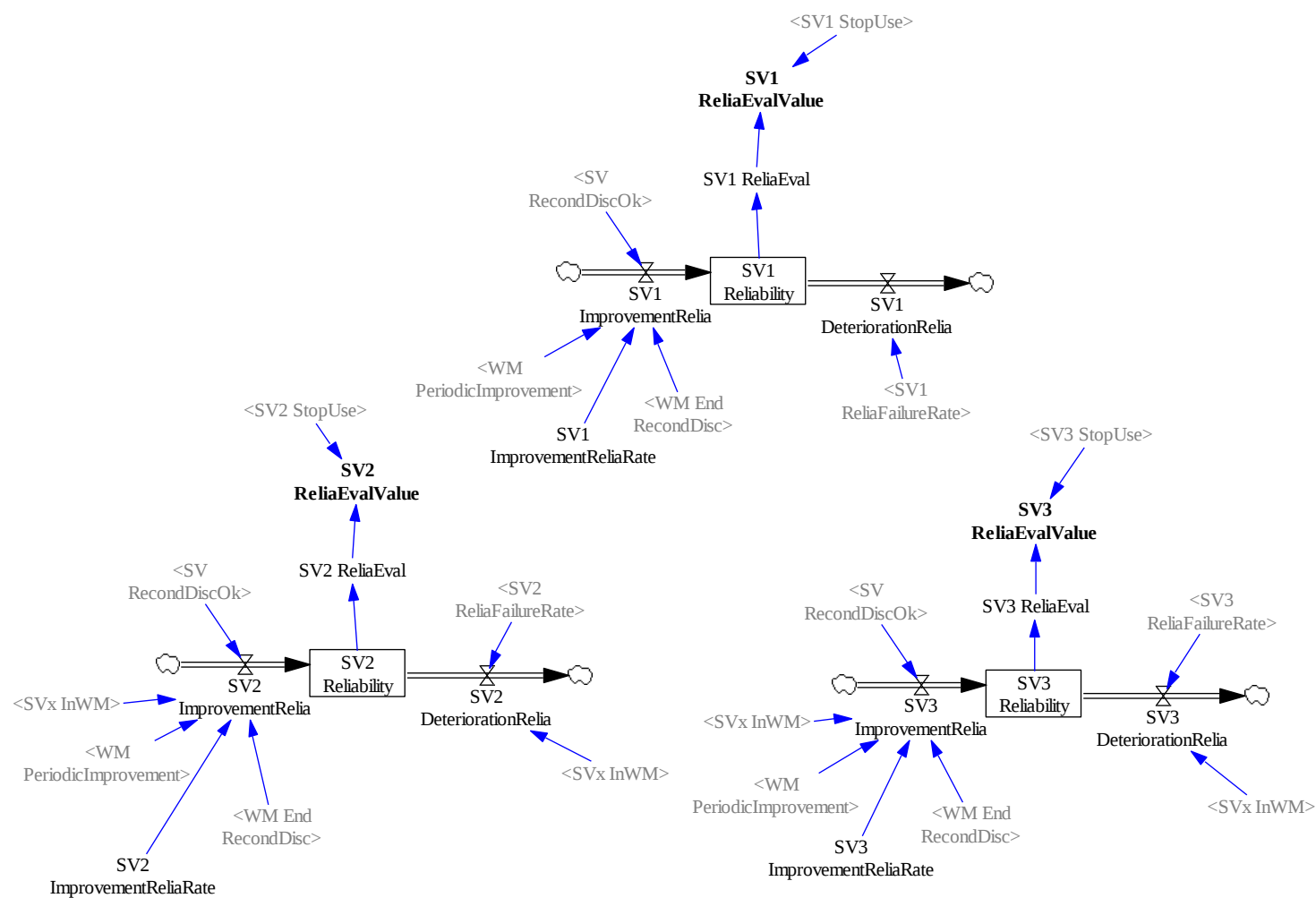
Etat technique des sous-ensembles

Figure A4.90 - Evolution de la variable de fiabilité des électrovannes

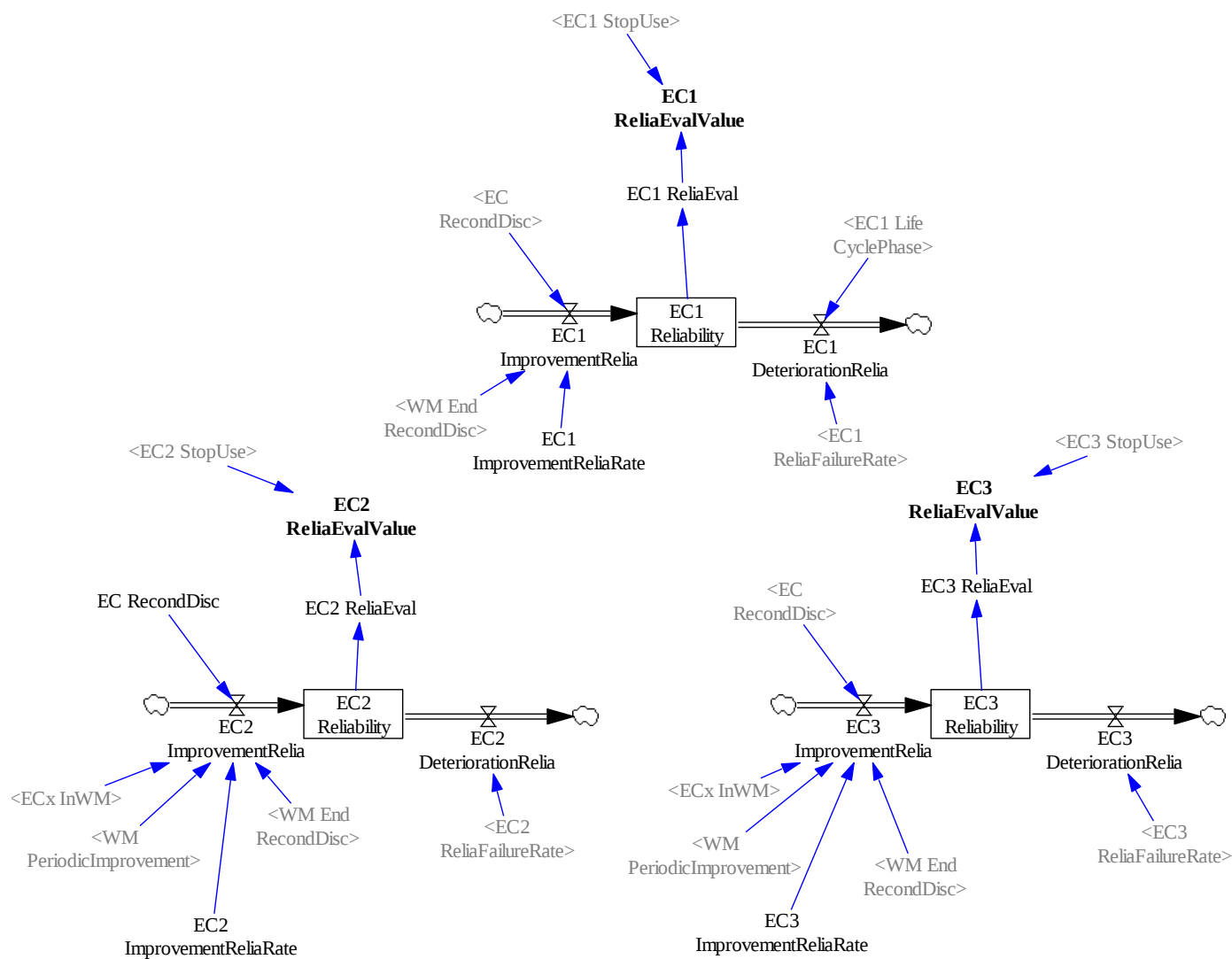


Figure A4.91 - Evolution de la variable de fiabilité des cartes électroniques de commande

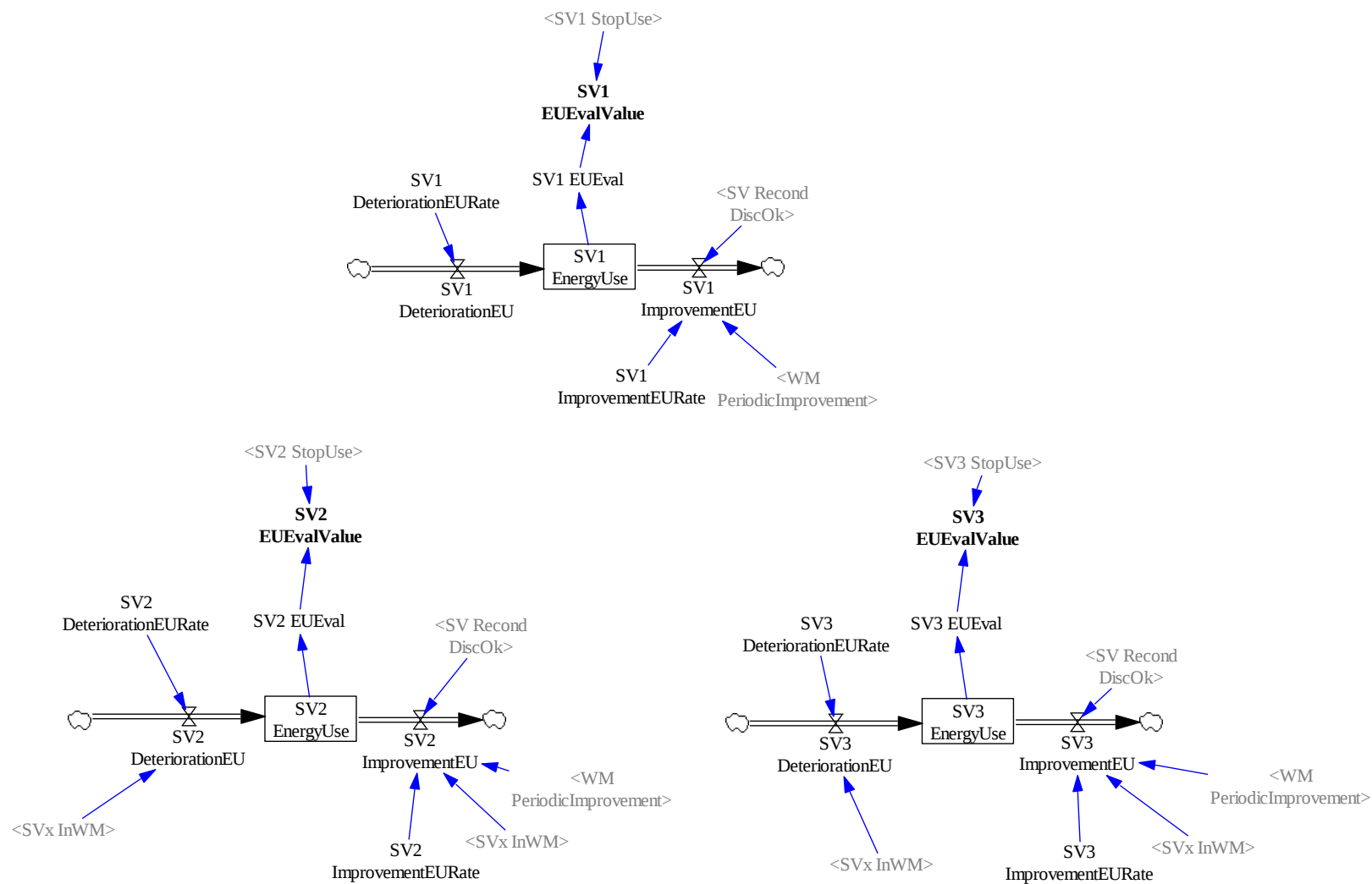


Figure A4.92 - Evolution de la variable de consommation énergétique des électrovannes

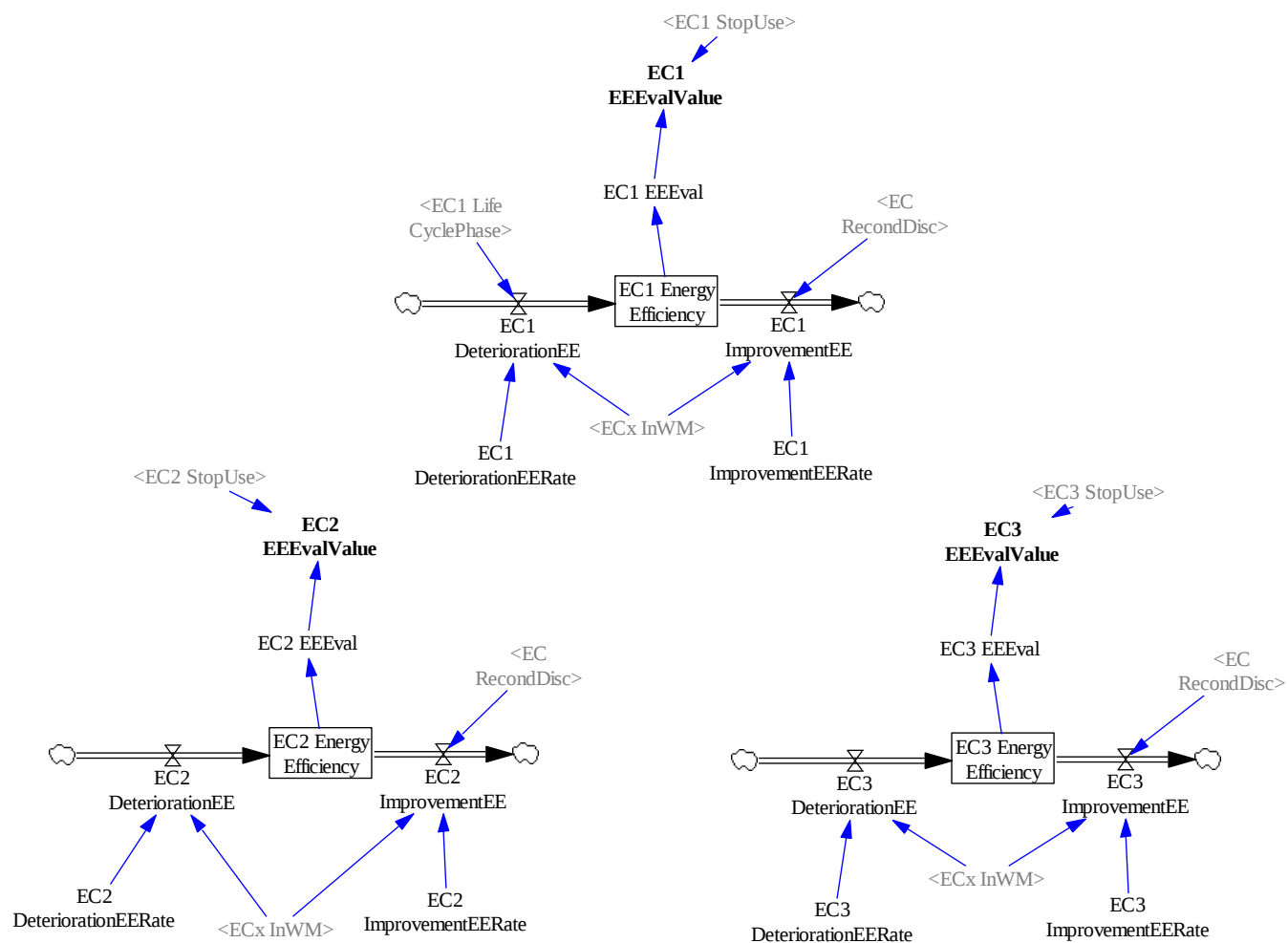


Figure A4.93 - Evolution de la variable de consommation énergétique des cartes électroniques de commande

Prise en compte de la maintenance périodique dans le scénario 3

Dans le scénario 3, les actions de maintenance périodique impactent l'évolution des variables considérées dans l'état de santé du lave-linge et de ses sous-ensembles en les améliorant. Les dates auxquelles les maintenances sont réalisées sur le lave-linge dépendent du fournisseur en possession du lave-linge (Figure A4.94).

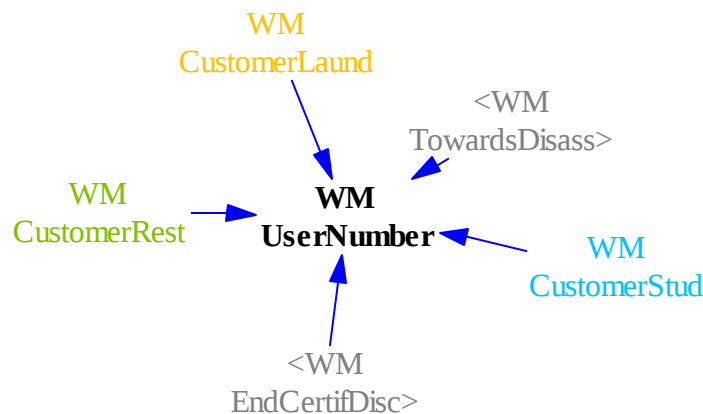


Figure A4.94 - Identification de l'acquéreur et utilisateur du lave-linge_nutriment

La Figure A4.95 permet d'identifier les dates auxquelles les maintenances sont réalisées sur le lave-linge chez les fournisseurs.

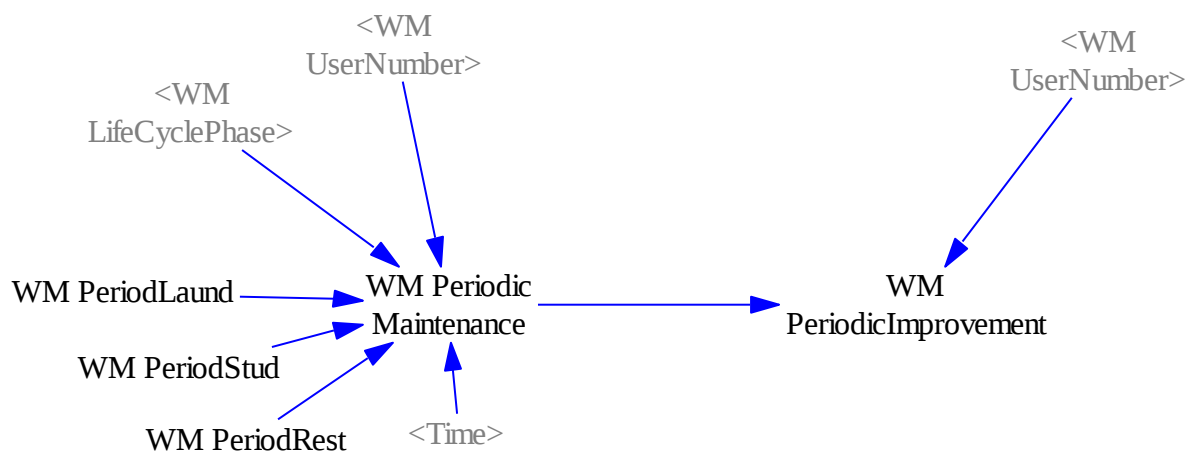


Figure A4.95 - Modélisation de la prise en compte de la maintenance périodique chez les fournisseurs

II. Evaluation des coûts de régénération

Dans la politique 1, le client ne réalise que des dépenses en achetant un lave-linge ou en remplaçant les sous-ensembles défectueux (cas du scénario 2).

Dans la politique 2, le fournisseur engendre des gains en revendant le lave-linge qu'il exploite. Nous ne modélisons donc les coûts de la régénération pour les fournisseurs/clients (ici, la laverie - Figure A4.96) et les régénérateurs (ici, le déconnecteur - Figure A4.97) que dans le cas du S3. La modélisation des coûts de régénération n'est réalisée que pour le scénario 3.

Fournisseur

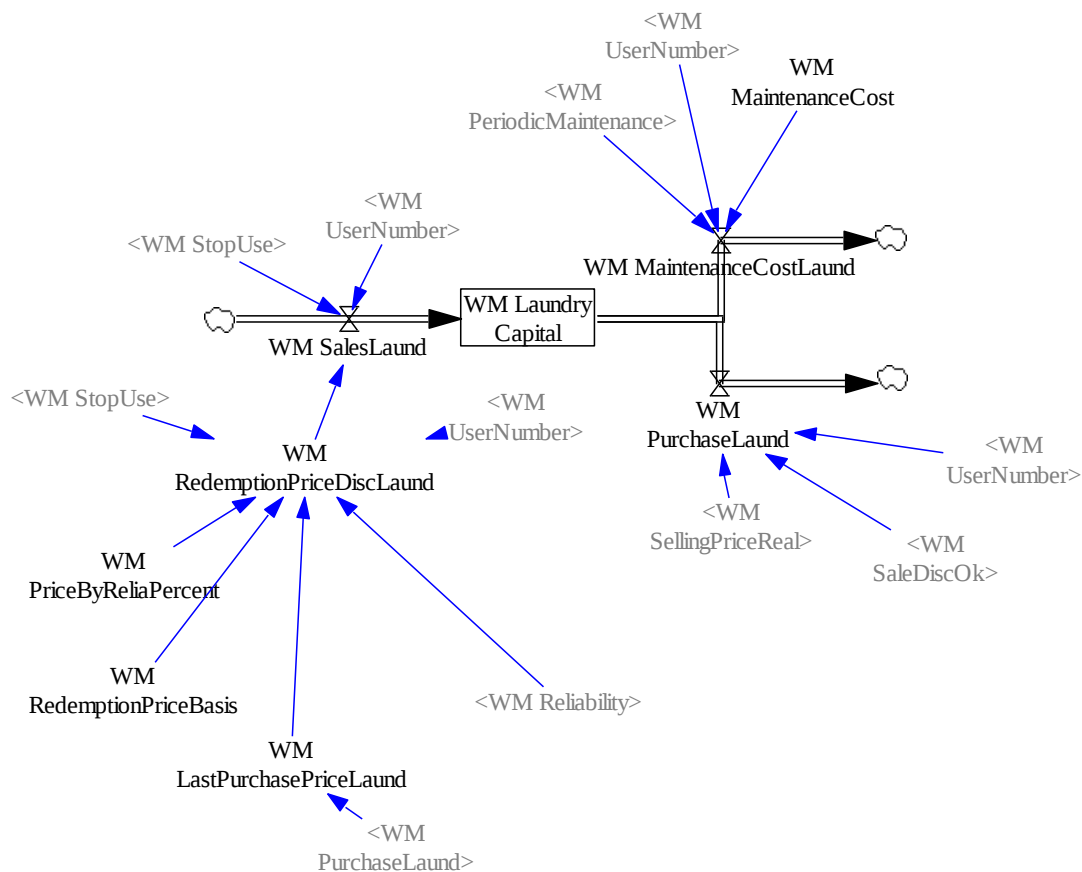


Figure A4.96 - Modélisation des capitaux engendrés par le fournisseur laverie via la vente de son lave-linge, de l'achat d'un nouveau lave-linge (neuf ou régénéré) et des actions de maintenance réalisées

Les dépenses de la laverie dépendent de la fréquence et du coût des maintenances périodiques mises en place durant l'utilisation (« *WM MaintenanceCostLaund* » - Équation A4.57), et du prix d'achat du lave-linge_nutriment (« *WM PurchaseLaund* » - Équation A4.58).

Équation A4.57

WM MaintenanceCostLaund

$$= \begin{cases} WM \text{ MaintenanceCost}, & (WM \text{ UserNumber} = 1 \text{ et } WM \text{ PeriodicMaintenance} = 1) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Où « *WM UserNumber* » = 1 correspond à la laverie et « *WM PeriodicMaintenance* = 1 signifie qu'une maintenance périodique a été réalisée

Équation A4.58

$$WM \text{ PurchaseLaund} = \begin{cases} WM \text{ SellingPriceReal}, & (WM \text{ UserNumber} = 1 \text{ et } WM \text{ SaleDiscOk} = 1) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Les gains de la laverie (« *WM SalesLaund* ») dépendent du prix de vente du lave-linge_déchet (« *WM RedemptionPriceDiscLaund* ») que le fournisseur envoie en régénération. Ce prix correspond à 20% du prix d'achat du lave-linge (neuf ou régénéré) (« *WM LastPurchasePriceLaund* ») auquel s'ajoute un prix associé à la fiabilité restante du lave-linge_déchet.

Régénérateur

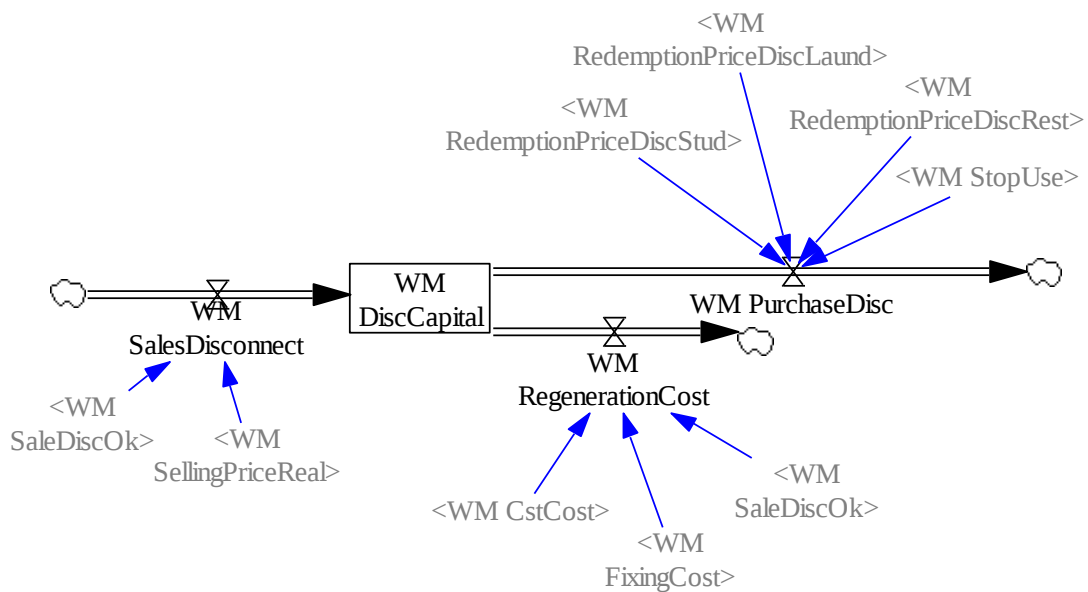


Figure A4.97 - Modélisation des capitaux engendrés par le déconnecteur via la vente de lave-linge régénéré et les actions de régénération réalisées

Les dépenses du déconnecteur dépendent du prix d'achat du lave-linge_déchet auprès des fournisseurs (« *WM PurchaseDisc* »), et du coût des actions de régénération (« *WM RegenerationCost* » - Équation A4.59).

Équation A4.59

$$WM\ RegenerationCost = \begin{cases} WM\ CstCost + WM\ FixingCost, & (WM\ SaleDiscOk = 1) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Où, *WM FixingCost* est égal au « durée mise pour faire la remise en état » * « coût des compétences nécessaires »

Et, *WM CstCost* correspond à la somme des coûts d'exécution des diagnostics, de la requalification et de la vente du lave-linge.

Les gains du déconnecteur («*WM SalesDisconnect*») dépendent du prix de vente du lave-linge_nutriment aux clients («*WM SellingPriceReal*») et correspond aux coûts de régénération, auxquels s'ajoutent le prix de la fiabilité restante et le prix de la classe à laquelle appartient le lave-linge_nutriment.

III. Coûts - Résultats

Un des points clés pour la mise en place de la régénération est qu'elle doit permettre de dégager des bénéfices ou au moins de réduire les dépenses réalisées lors de l'achat de produit neuf.

Pour illustrer l'aspect économique, nous considérons un seul lave-linge qui évolue au sein de différents types d'utilisateurs (laverie, résidence et restaurant). Nous prenons comme exemple le cas de succession d'utilisateurs suivant (Figure A4.98) : laverie, résidence, restaurant, résidence pour le S2 (en rouge) et, laverie, résidence, résidence, restaurant, résidence pour le S3 (en bleu).

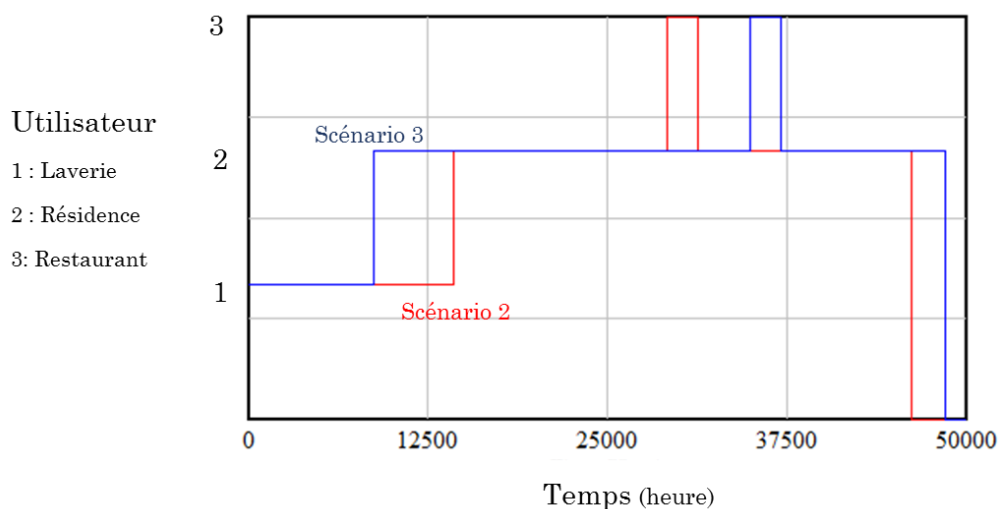


Figure A4.98 - Utilisateurs successifs du lave-linge pour le S2 et S3

Intérêt économique pour les fournisseurs/clients du lave-linge

Laverie

Les clients type laverie ne possèdent le lave-linge qu'une seule fois, au moment de sa mise en vente en tant que lave-linge neuf. Cet achat engendre une dépense de 5 600€ (Figure A4.99). Dans le S2, cette valeur n'évolue pas puisqu'aucune vente ou maintenance n'est réalisée. En revanche, dans le S3, la laverie réalise 5 maintenances avant de vendre le lave-linge au déconnecteur. Suite à un dépassement du seuil de fiabilité, le lave-linge_déchet est vendu et permet à la laverie de réaliser un gain d'environ 1 500€, permettant de réduire le coût d'achat du prochain lave-linge_nutriment.

La mise en place du flux tiré est donc intéressante pour ce type de client.

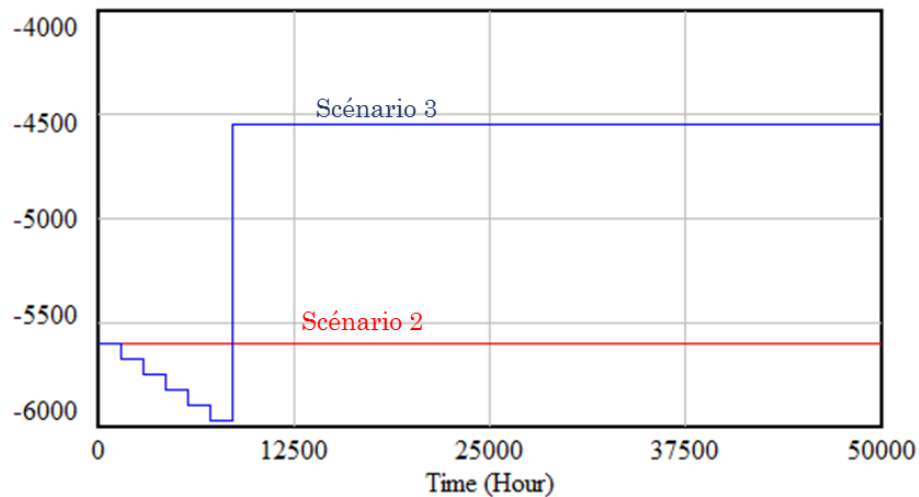


Figure A4.99 - Capitaux du client type laverie pour le lave-linge observé

Résidence étudiante

Les clients type résidence étudiante possèdent le lave-linge : deux fois dans le S2, et trois fois dans le S3. Contrairement au client précédent, nous constatons que la courbe des capitaux du S3 est inférieure à celle du S2 (Figure A4.100), ce qui signifie que le flux tiré n'est pas forcément bénéfique pour la résidence, ou qu'une succession trop importante de ce type de client n'est pas la meilleure solution. En effet, la durée minimale d'utilisation étant fixée à plus de 11 000h (7 ans), le nombre de régénération est réduit ; et par conséquent, le taux de défaillance ne peut être significativement amélioré.

Le prix de vente est impacté par ce manque de régénération puisque pour le dernier client, le prix de vente est de l'ordre de 200€ contre 900€ pour le 2^{ème}. Cette baisse du prix est due à la phase d'usure du lave-linge (la fiabilité diminue fortement) et à la durée minimale d'utilisation imposée par l'outil.

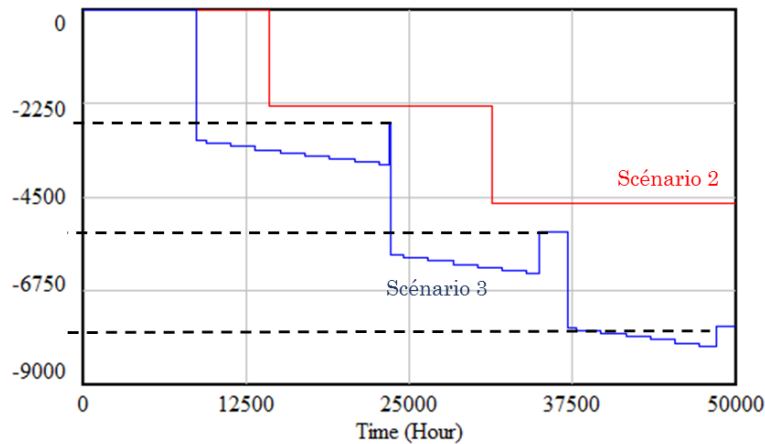


Figure A4.100 - Capitaux du client type résidence pour le lave-linge observé

Restaurant

Les clients type restaurant possèdent le lave-linge une seule fois dans S2 et S3 (Figure A4.101). Pour ce type de client, la mise en place du flux tiré est intéressante puisque le prix d'achat du lave-linge_nutriment, dans le S3, est inférieur de 250€ à celui du S2 tout en offrant des performances similaires. De plus, les coûts de maintenance périodique sont moindres car les restaurants utilisent le lave-linge sur un nombre d'heures très faibles par rapport au cycle de vie du lave-linge. Cette faible durée d'utilisation permet au restaurant d'utiliser le lave-linge sur la période qu'il s'est fixé avant de le vendre. La vente du lave-linge_déchet est également bénéfique puisqu'elle rapporte près de 650€, soit la moitié du prix d'achat du lave-linge_nutriment.

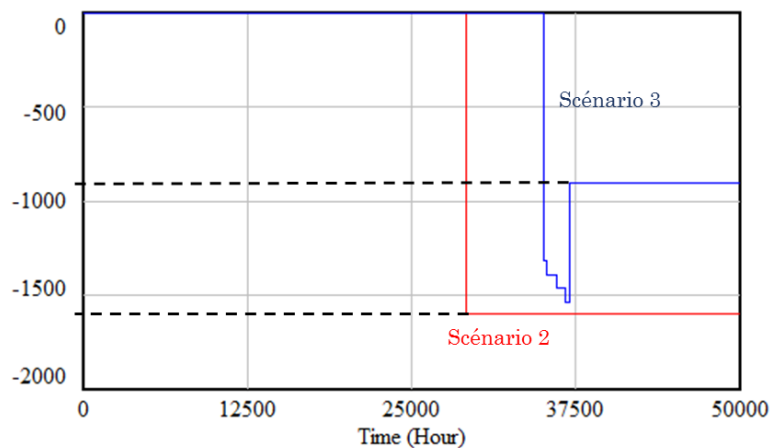


Figure A4.101 - Capitaux du client type restaurant pour le lave-linge observé

Intérêt économique pour les régénérateurs (déconnecteur)

Dans le cas des régénérateurs, il est évident que le flux poussé leur est financièrement bénéfique (Figure A4.102 – courbe rouge) puisqu'ils n'achètent pas le lave-linge_déchet mais le récupère auprès des décharges. Ils ne peuvent donc que dégager des bénéfices de

la vente de ceux qu'ils ont régénérés. De plus, lave-linge_déchet n'est régénéré que si le régénérateur estime pouvoir couvrir les coûts de régénération.

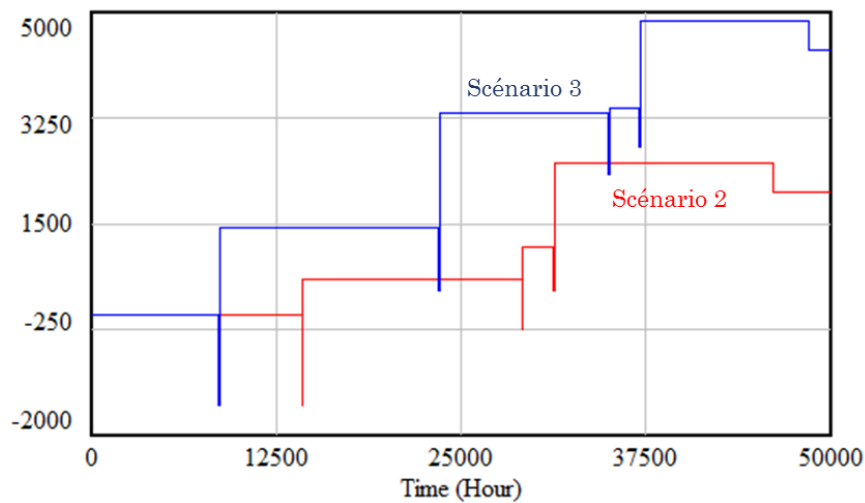


Figure A4.102 - Capitaux du déconnecteur pour les S2 et S3

Dans le cas du flux tiré, les déconnecteurs achètent le lave-linge_déchet à leurs fournisseurs, ce qui devrait diminuer les bénéfices engendrés. Toutefois, dans notre exemple, nous pouvons constater que la courbe du S3 est supérieure à celle du S2 (Figure A4.102 – courbe bleu), ce qui signifie que le flux tiré engendre plus de bénéfices que le flux poussé. Ce résultat est dû à la réduction des coûts de régénération (l'état de santé du lave-linge_déchet est meilleur dans le S3 que dans le S2) et au prix de revente qui est proportionnel à cet état de santé.

D'un point de vue économique, le flux tiré n'est pas bénéfique à l'ensemble des parties prenantes. La limitation d'exploitation par un seuil de fiabilité augmente le prix d'achat du lave-linge_nutriment par le client, car l'état de santé et la fiabilité sont élevés, entraînant une sur-dépense par rapport au flux poussé. Enfin de satisfaire l'économie de toutes parties prenantes, la date de minimale de fin d'utilisation du client N et le seuil de fiabilité doivent pouvoir s'adapter au client N+1.

Résumé :

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la définition du paradigme de régénération issu des principes du développement durable et de l'économie circulaire. L'idée est de limiter l'épuisement des ressources de la sphère naturelle en exploitant les gisements de «déchets» de la sphère technique et en diminuant la production de déchets. La notion de régénération émerge d'une analogie entre la sphère naturelle et la sphère technique, et fait apparaître les concepts de «nutriments» et de «décomposeurs». Le concept de nutriment permet de revisiter la fin de vie d'équipements domestiques ou industriels, en les voyant comme des nutriments techniques capables de nourrir certaines filières industrielles après transformation. Ces transformations sont opérées par des décomposeurs dans le milieu naturel, et des régénérateurs dans le milieu industriel. Quatre types de régénérateurs ont été définis. Pour chaque type de régénérateurs, des exigences sur le produit devant être satisfaites par les produits «déchets» sont identifiées afin d'assurer la régénération de ces produits. D'autres exigences ont été définies au niveau du processus de régénération pour spécifier les actions de régénération. Ces deux types d'exigences doivent être maintenus tout au long du cycle de vie du produit. La maintenance a été identifiée comme le processus fondamental pour surveiller et maintenir au travers du temps la capacité de régénération et ainsi prolonger la durée de vie des produits. Lorsque les régénérateurs mettent en place une stratégie de régénération, il est nécessaire d'évaluer sa faisabilité. Nous avons donc proposé un outil d'aide à la décision, en modélisant d'une part le comportement du produit au cours de son cycle de vie, ainsi que le comportement des régénérateurs, et d'autre part l'effet des exigences sur le produit et sur le processus. Les modèles choisis sont les System Dynamics qui permettent la modélisation et la simulation des interactions entre les variables d'un système complexe. Cet outil d'aide à la décision permet d'éprouver les propositions de la thèse, au tour d'un exemple de régénération d'un D3E.

Mots-clés : Régénération, Maintenance prévisionnelle, Economie Circulaire, Cycle de vie produit, Exigences, System Dynamics, Aide à la décision

Abstract:

This thesis is dedicated to the regeneration paradigm from the principles of sustainable development and circular economy. The intention is to limit the exhaustion of natural resources and to reduce waste production through exploiting “waste” deposits of technosphere. The notion of regeneration emerges from an analogy between the natural and technical sphere. It brings to light the concepts of “nutrients” and “decomposers”. The nutrient concept enables to revisit the end of life of domestic or industrial equipment. These equipment are seen as technical nutrients that can feed industrial sectors. The regenerators, called decomposers in nature, are intermediates processors to process “waste” in technical nutrients. Four regenerators have been identified. For each regenerator, product requirements are identified to ensure the regeneration of “waste” product. Additional requirements have been defined in the regeneration process to specify regeneration actions. These two types of requirements must be maintained throughout the product lifecycle. Maintenance process has been identified as fundamental industrial process to monitor and maintain over time the regeneration capability of a product. When regenerators implement a regeneration strategy, it is necessary to assess its feasibility. That is why we proposed a decision-making tool by modeling the product's behavior during its lifecycle and the regenerator's behavior, and the effect of the requirements on the product and process. The selected models are System Dynamics. These models allow the modeling and simulation of interactions between the variables of a complex system. The decision-making tool allow test the proposals of this thesis through a regeneration example of an electronic waste.

Keywords: Regeneration, Predictive Maintenance, Circular Economy, Product Lifecycle, Requirements, System Dynamics, Decision-making