



HAL
open science

Approche d'évaluation de la durabilité des systemes guidée par la pensée cycle de vie : application à l'agroindustrie oléicole

Guillaume Busset

► To cite this version:

Guillaume Busset. Approche d'évaluation de la durabilité des systemes guidée par la pensée cycle de vie : application à l'agroindustrie oléicole. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2014. Français. NNT : 2014INPT0050 . tel-04262031

HAL Id: tel-04262031

<https://theses.hal.science/tel-04262031v1>

Submitted on 27 Oct 2023

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Sciences des Agroressources

Présentée et soutenue par :

M. GUILLAUME BUSSET

le vendredi 11 juillet 2014

Titre :

APPROCHE D'EVALUATION DE LA DURABILITE DES SYSTEMES
GUIDEE PAR LA PENSEE CYCLE DE VIE : APPLICATION A L'AGRO-
INDUSTRIE OLEICOLE

Ecole doctorale :

Sciences de la Matière (SDM)

Unité de recherche :

Laboratoire de Chimie Agro-Industrielle (L.C.A.)

Directeur(s) de Thèse :

MME MIREILLE VIGNOLES

M. JEAN PIERRE BELAUD

Rapporteurs :

Mme VERONIQUE BELLON MAUREL, IRSTEA

M. NICOLAS PERRY, ENSAM BORDEAUX

Membre(s) du jury :

M. CARLOS VACA GARCIA, INP TOULOUSE, Président

Mme MIREILLE VIGNOLES, INP TOULOUSE, Membre

Mme PASCALE ZARATE, UNIVERSITE TOULOUSE 1, Membre

Mme TATIANA REYES, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES, Membre

Résumé

À l'heure où toute décision stratégique doit être conforme aux principes de la durabilité, l'évaluation des conséquences environnementales, économiques et sociales d'un choix d'ingénierie s'avère nécessaire. Parmi les outils d'évaluation des systèmes et de leurs conséquences, l'analyse de cycle de vie (ACV) dérivée de la pensée cycle de vie s'est imposée comme la méthode la plus adaptée à un tel niveau de décision. Historiquement focalisée sur les impacts environnementaux, l'ACV a naturellement étendue son champ d'évaluation aux aspects économiques, sociaux et d'ingénierie pour devenir une analyse de la durabilité (AdCV) des systèmes. L'AdCV est ainsi en train d'émerger et nécessite des propositions d'améliorations méthodologiques et des applications concrètes pour devenir robuste et applicable. Cette étude présente l'évaluation de la durabilité d'un système dans le contexte de l'agro-industrie oléicole. À cet effet, elle propose une approche intégrée d'évaluation de la durabilité basée sur l'AdCV couplée à la modélisation des processus et des procédés et, l'analyse multicritère pour l'aide à la décision. Une première partie traite des concepts de durabilité, d'ingénierie et d'agro-industrie oléicole à travers une analyse de la littérature scientifique. Dans la deuxième partie, l'approche d'évaluation de la durabilité proposée est décrite, formalisée et implémentée dans la solution logicielle « Olive » à l'aide d'outils empruntés à la modélisation des systèmes. Enfin, la troisième partie présente les résultats de l'application de l'approche à l'agro-industrie oléicole en s'appuyant sur un ensemble de données terrain récoltées dans le cadre du projet européen OiLCA.

Mots clefs : Durabilité, Analyse de cycle de vie, Modélisation d'entreprise, Simulation, Aide à la décision multicritère, Procédés agro-industriels.

Abstract

Nowadays, any strategic decision must be in accordance with the sustainability principles. Therefore, companies need to evaluate the consequences of their activities and products onto environment, economy and society. Life cycle assessment (LCA) from Life cycle thinking (LCT) is one of the major environmental impact evaluation methods for product, process or service and the trends is to integrate economic and social aspects to become a life cycle sustainability assessment (LCSA). However, LCSA is still in its infancy and needs methodological proposals to be applicable. This study presents sustainability assessment in the olive oil agro-industrial context. In doing so, a systemic approach based on the coupling between LCSA, enterprise modeling, chemical process modeling and multicriteria analysis is proposed. The approach is then validated by the development of the software solution “&colive” for sustainability assessment of olive oil production. This application relies on field data collected under the European OiLCA project.

Keywords: Sustainability, Life cycle assessment, Enterprise modeling, Simulation, Multicriteria decision making, agro-industrial processes.

Remerciements

À travers cette partie, je souhaite manifester ma reconnaissance à l'égard des personnes qui ont contribué de près ou de loin à mon travail de thèse.

Tout d'abord, je réitère mes remerciements aux deux rapporteurs, Véronique Bellon-Maurel et Nicolas Perry pour avoir accepté de relire mon manuscrit. Les rapports qu'ils ont rédigés m'ont non seulement permis de mettre en perspective mes travaux, mais également de corriger quelques erreurs. Lors de ma soutenance, j'ai eu plaisir à discuter de vive voix avec eux ainsi qu'avec les autres membres du jury, à savoir Pascale Zaraté, Tatiana Reyes, Carlos Vaca Garcia, président du jury et directeur du LCA ainsi que Jean-Marc Le Lann, directeur de l'ENSIACET. J'ai été honoré de leur présence, particulièrement de celle de Carlos qui a fait l'aller-retour France-Corée du Sud pour participer à mon jury (même si ce trajet en avion alourdit l'empreinte environnementale de l'évènement...). Je tiens à souligner la parité de mon jury.

En tant que directeurs de thèse, les trois derniers membres de mon jury sont évidemment à part. Merci à Mireille, Caroline et Jean-Pierre pour leur présence, leur réactivité, leur sincérité et leur exigence. J'ai énormément appris de leur complémentarité et de leur expérience. Je me réjouis de continuer à travailler 1 an avec Caroline et Jean-Pierre. Je souhaite à Mireille le meilleur pour sa retraite, surtout un peu de repos pour souffler après cette dernière année rocambolesque.

Je souhaite également remercier Christian Pinatel, Sébastien Leverage et Daniel Husson du CTO pour leur accueil et pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée, notamment en ce qui concerne la découverte du secteur oléicole. J'ai eu la chance de découvrir que l'huile d'olive pouvait se déguster comme un vin, avec tout un jargon poétique pour la décrire. Merci aux producteurs d'huile d'olive qui m'ont accueilli et qui ont accepté de me consacrer du temps pour répondre aux questionnaires dont j'avais besoin pour mes travaux. Je terminerai mes remerciements « oléicoles » par l'ensemble des membres du projet OiLCA avec qui nous avons travaillé : Raquel Trillo et Carmen Capiscol de CITOLIVA, Frederic Clarens et José Jorge Espi de CTM, Florentina Delgado, Lorenzo Chacon et Víctor Vázquez d'IAT, Joana Carvalho, Bruna Fonseca et Jorge Araujo de CVR. J'adresse une mention spéciale à Frederic et José de CTM pour la partie méthodologique dont nous étions responsables ensemble. Merci pour leur accueil à Manresa et pour leur patience. Je fais enfin un clin d'œil à Raquel qui a donné vie à un enfant pendant le projet.

Je tiens à remercier ma stagiaire, Sonia, avec qui nous allons proposer un article sur l'ASCV. Je remercie les étudiants qui ont travaillé pour moi et qui m'ont permis de gagner un temps précieux : Florian Fosse et Raphaël Sanjuan ; Sandra Le Mignan ; Hatim Abdelmoumen, Hanae El Boussairi, Guillaume Morini, Robin Naval, Chralotte Sapin et Jean-David Sauvan. Merci particulièrement à Guillaume qui m'a plongé dans le monde des macros VBA et grâce auquel j'ai pu développer l'outil informatique qui illustre le cœur de ma thèse.

Je remercie également les membres de l'AFIS et ceux du groupe EASY-DIM qui m'ont accueilli bien que mon cas d'étude ne figure pas parmi les cas usuels visés par l'ingénierie d'entreprise et l'ingénierie système.

Voilà bientôt 5 ans que je travaille au LCA. J'ai eu la chance de côtoyer plusieurs « promos » de doctorants. Parmi les plus anciens, je pense à Sylvain, Romain, Matthieu S, Dorothée, William, Nicoletta, Louise, Anaïs, Manon, Émeline, Julien P., Julien B., Leslie, Émilie, Mike, Lupita, Zaher et les autres. Entre les QUPUC, le triathlon, le foot ou le vélo, nous avons partagé une grande quantité de bons moments. C'est en les voyant au quotidien que j'ai été rassuré sur le quotidien d'un thésard.

Je remercie spécialement les membres de l' « équipe Mireille », Claire, Audrey, Stéphanie, Christophe C. et Olivier L. avec qui nous avons partagé Tommy's et 3 brasseurs pour nous lamenter sur notre sort!

Je souhaite une bonne fin de thèse à la relève : Jean-Baptiste, Thibaut, Benjamin, Bastien, Alice, Natalia, Djibril, Assad, Cécile et les autres.

Je remercie tous les autres membres ingénieurs, techniciens, cadres, personnels administratifs. J'adresse une mention spéciale à Jérôme Peydecastaing que les remerciements n'intéressent pas mais à qui je tiens quand même à faire part du plaisir que j'ai eu à partager des conversations singulières, au cours desquelles ont convergé le réaliste et l'idéaliste...

Je termine mes remerciements LCAiens par Julien B. et Leslie, collègues devenus amis. Nos conversations ont largement dépassé le cadre du laboratoire et de la recherche. J'aurais bien aimé finir un peu plus tôt pour vivre en même temps que vous ce marathon final que représente la rédaction du manuscrit...

Ma co-direction m'a amené à emménager dans un bureau du département PSI du LGC. J'ai été accueilli par un mexicain (Jesus), un égyptien (Attia) et un hongrois (Lazslo). J'ai ainsi pu voya-

ger sur trois continents grâce à eux! Leur gentillesse et leur richesse culturelle m'ont beaucoup apporté sur le plan humain. Par chance, j'ai retrouvé deux collègues d'une même gentillesse, cette fois locale mais exotique tout de même, grâce à Benoit et son accent pur produit du sud-ouest et Guillaume, immigré du nord-est. Notons pour l'exotisme qu'ils n'appartiennent pas au département PSI mais au département STPI.

Le couloir PSI est un peu particulier. C'est le seul de tout l'ENSIACET dont la langue officielle est l'espagnol! J'ai découvert un groupe très chaleureux. Merci à tous pour le quotidien et la formule RU-*futbalito*. Merci à Raul avec qui nous avons gagné les deux tournois.

Merci donc à la bande PSI : Marco, Sofia, Antonio, Raul, Marie, Manuel, Philippe, René, Ségolène, Phuong Anh, Xinqiang, Stéphane et Ahmed.

Le couloir PSI est également le couloir des papas. Marco, Attia, Fernando, René! À qui le tour ?

J'ai une pensée spéciale pour Marco et Sofia en qui j'ai découvert deux personnes lumineuses et qui comptent particulièrement.

Une thèse constitue un travail qui dépasse le cadre professionnel en s'immisçant dans les nuits du doctorant, particulièrement les six derniers mois. Aussi est-il naturel de rendre hommage à ceux qui ont partagé mon quotidien et à ceux qui constitue le socle de ma vie : ma famille.

Je remercie donc mes parents et mes deux frères. J'ai beaucoup pensé à eux et à la fierté qu'il y aurait dans leurs yeux en me voyant docteur. J'ai été secrètement ému d'annoncer à ma mère que je m'engageais dans pareille aventure. Finalement, j'étais profondément heureux que mes parents soient présents le jour du rite de passage que constitue la soutenance.

Ma famille se tourne également vers l'avenir grâce à ma compagne, Magali et nos deux fils, Armand et Camille, nés pendant ces trois années intenses. Merci infiniment pour ce qu'elle est, pour son soutien. Elle a su – et sait - m'aider aux moments où j'en avais besoin. Merci à nos enfants qui n'ont pas toujours compris pourquoi leur papa travaillait quand il était devant l'ordinateur. Je me réjouis de ces années que nous venons de passer et surtout de celles qui s'annoncent, plus douces et plus ensommeillées.

Table des matières

Introduction.....	1
Partie A. Contexte scientifique & état de l’art	5
Chapitre 1. Du développement durable à la durabilité	7
1.1 Histoire du développement durable	7
1.1.1 <i>Le développement</i>	7
1.1.2 <i>L’écologie et la systémie</i>	7
1.2 Discussion sémantique.....	9
1.2.1 <i>Le développement durable</i>	9
1.2.2 <i>Au-delà du développement durable</i>	12
1.2.3 <i>Parties prenantes</i>	12
Chapitre 2. Outils & méthodes pour la durabilité	15
2.1 Typologie	15
2.2 Des critères & indicateurs	17
2.2.1 <i>Analyse & évaluation</i>	17
2.2.2 <i>Analyse multicritère</i>	18
2.3 L’analyse du cycle de vie.....	20
2.3.1 <i>Définition</i>	20
2.3.2 <i>Structure générale de l’analyse de cycle de vie</i>	21
2.3.3 <i>Analyse environnementale du cycle de vie</i>	23
2.3.4 <i>Analyse des coûts du cycle de vie</i>	25
2.3.5 <i>Analyse sociale du cycle de vie</i>	26
2.3.6 <i>Analyse de la durabilité du cycle de vie</i>	27
2.3.7 <i>Exemple d’utilisation des résultats d’AeCV : l’affichage environnemental</i>	28
2.3.8 <i>Limites</i>	30
2.4 Couplage des outils & méthodes	30
2.5 Conclusion	31
Chapitre 3. L’ingénierie d’entreprise pour la durabilité des systèmes..	33
3.1 Ingénierie des systèmes.....	34
3.1.1 <i>Définitions préliminaires</i>	34

3.1.2	<i>Opérations sur les systèmes et leurs modèles</i>	40
3.1.3	<i>Approche orientée processus</i>	42
3.2	Ingénierie d'entreprise	45
3.2.1	<i>Définitions</i>	45
3.2.2	<i>Modélisation d'entreprise</i>	46
3.3	Cas de l'écoconception	50
3.3.1	<i>Définition</i>	51
3.3.2	<i>Outils</i>	51
3.3.3	<i>Vers une approche d'intégration produit-procédé-entreprise</i>	52
3.4	Conclusion	55
Chapitre 4. La durabilité dans l'agro-industrie oléicole		57
4.1	Contexte	57
4.1.1	<i>Économie & social</i>	57
4.1.2	<i>Santé & alimentation</i>	58
4.2	Description du système de production d'huile d'olive	59
4.2.1	<i>Production des olives</i>	60
4.2.2	<i>Extraction de l'huile d'olive vierge</i>	61
4.2.3	<i>Extraction de l'huile de grignons brute</i>	62
4.2.4	<i>Raffinage</i>	63
4.2.5	<i>Stockage & Mise en bouteilles</i>	63
4.2.6	<i>Utilisation</i>	63
4.2.7	<i>Fin de vie</i>	63
4.2.8	<i>Transports</i>	64
4.3	Vers une analyse de la durabilité du cycle de vie de l'huile d'olive.....	65
4.3.1	<i>Définition & champ de l'étude</i>	66
4.3.2	<i>Inventaire du cycle de vie</i>	69
4.3.3	<i>Évaluation des impacts</i>	73
4.4	Conclusion	74
Partie B. Définition de l'approche		75
Chapitre 5. Nécessité		77
5.1	Verrous scientifiques	77
5.1.1	<i>Évaluation de la durabilité</i>	77

5.1.2	<i>Ingénierie d'entreprise & conception durable de systèmes</i>	78
5.2	Propositions.....	84
Chapitre 6. Caractérisation générique		85
6.1	Objectifs.....	85
6.2	Portée.....	85
6.3	Structure globale.....	88
6.4	Caractéristiques des modèles.....	93
6.4.1	<i>Modèles du système</i>	93
6.4.2	<i>Modèles d'évaluation</i>	99
6.4.3	<i>Intégration des modèles</i>	103
6.5	Ontologie.....	106
6.5.1	<i>Classes</i>	106
6.5.2	<i>Relations</i>	108
6.5.3	<i>Instances</i>	109
6.6	Conclusion	112
Chapitre 7. Caractérisation partielle.....		113
7.1	Systèmes agro-industriels.....	113
7.2	Modèles d'évaluation.....	115
7.2.1	<i>Évaluation orientée procédé</i>	116
7.2.2	<i>Évaluation orientée produit</i>	116
7.2.3	<i>Évaluation orientée entreprise</i>	119
7.2.4	<i>Évaluation de l'incertitude des données</i>	121
7.3	Analyse multicritère pour la durabilité	122
7.3.1	<i>Volets environnemental & social</i>	123
7.3.2	<i>Volets économique, technique & pertinence de l'étude</i>	125
7.4	Conclusion	127
Chapitre 8. Implémentation		129
8.1	Structure générale de l'outil &cOlive	129
8.2	Structure détaillée	132
8.2.1	<i>Feuilles de démarrage</i>	132
8.2.2	<i>Onglets pour la saisie des données initiales</i>	133
8.2.3	<i>Feuilles de modification de données et paramètres</i>	139
8.2.4	<i>Feuilles de calculs d'impacts</i>	140

8.2.5	<i>Feuilles de résultats</i>	142
8.3	Limites	144
Chapitre 9. Conclusion		147
 Partie C. Application à la production de l'huile d'olive vierge.. 149		
Chapitre 10. Objectifs & champ de l'étude.....		151
10.1	Contexte & objectifs : projet OiLCA.....	151
10.2	Fonction & unité fonctionnelle.....	152
10.3	Hypothèses & limites du système.....	153
Chapitre 11. Modélisation du système.....		155
11.1	Sous-système « verger »	157
11.1.1	<i>Pépinière</i>	157
11.1.2	<i>Entretien du sol</i>	157
11.1.3	<i>Irrigation</i>	157
11.1.4	<i>Fertilisation</i>	158
11.1.5	<i>Traitement phytosanitaire</i>	158
11.1.6	<i>Élagage/taille</i>	158
11.1.7	<i>Récolte</i>	159
11.2	Sous-système « moulin »	159
11.2.1	<i>Extraction de l'huile</i>	160
11.2.2	<i>Stockage & mise en bouteilles</i>	164
11.2.3	<i>Traitement des grignons, margines et eaux résiduelles</i>	164
11.2.4	<i>Fin de vie des bouteilles</i>	164
11.3	Scénarios	164
11.3.1	<i>Scénarios pour le sous-système « verger »</i>	164
11.3.2	<i>Scénarios pour le sous-système « moulin »</i>	165
11.3.3	<i>Scénarios pour le système de production d'huile d'olive</i>	167
Chapitre 12. Inventaire des données.....		169
12.1	Récolte des données brutes	169
12.1.1	<i>Données brutes pour le sous-système « verger »</i>	170
12.1.2	<i>Données brutes pour le sous-système « moulin »</i>	171
12.2	Simulation du procédé d'extraction.....	173
12.2.1	<i>Fractions massiques des composants des grignons</i>	174

12.2.2	<i>Fractions massiques des composants des margines</i>	174
12.2.3	<i>Débits d'eau</i>	175
12.2.4	<i>Débits de matière sèche</i>	175
12.2.5	<i>Débits de matière grasse</i>	176
12.3	Calculs d'inventaire	176
Chapitre 13. Résultats d'évaluation & interprétation		179
13.1	Évaluation technique du procédé & de l'incertitude.....	179
13.2	Évaluation du produit.....	180
13.2.1	<i>Analyse environnementale et des coûts du cycle de vie</i>	180
13.2.2	<i>Analyse de sensibilité</i>	185
13.2.3	<i>Analyse de Monte Carlo</i>	189
13.3	Évaluation de l'entreprise	191
13.3.1	<i>Analyse sociale du cycle de vie</i>	191
13.3.2	<i>Évaluation économique</i>	192
13.4	Évaluation de la durabilité	192
Chapitre 14. Conclusion		199
Conclusion & Perspectives.....		201
Références.....		209
Glossaire		221
Liste des abréviations.....		229
Annexes.....		233
Annexe 1.	Qualité des huiles d'olives.....	234
Annexe 2.	Produits phytosanitaires utilisables par les oléiculteurs professionnels	235
Annexe 3.	Représentation de l'ontologie de l'approche P ² E.....	236
Annexe 4.	Calcul des critères d'évaluation économique interne	237
Annexe 5.	Questionnaire d'inventaire social.....	241
Annexe 6.	Questionnaires d'inventaire environnemental et économique	244
Annexe 7.	Données brutes vergers.....	249

Annexe 8.	Données brutes moulins	251
Annexe 9.	Émissions dues à la combustion de carburants dans les engins agricoles	253
Annexe 10.	Matrice de pédigrée & facteurs d'incertitude	254
Annexe 11.	Caractéristiques des catégories d'impacts environnementaux sélectionnées.....	255
Annexe 12.	Facteurs d'impacts intermédiaires.....	256
	258
Annexe 13.	Résultats intermédiaires d'AeCV et d'AcCV pour un scénario moyen	259
Annexe 14.	Résultats d'AeCV et d'AcCV pour tous les scénarios étudiés	260
Annexe 15.	Résultats de l'analyse de sensibilité aux durées.....	261
Annexe 16.	Résultats de l'analyse de sensibilité aux rendements	262
Annexe 17.	Tableau de bord d'&cOlive	263
Annexe 18.	Livrables du projet OiLCA.....	264
Annexe 19.	Liste complète des actions de dissémination	267

Table des illustrations

Figure 1. Représentation du développement durable (Mancebo, 2010).....	10
Figure 2. Diagramme de Hub et Spoke (UNEP, 2009)	13
Figure 3. Organisation hiérarchique des principes, critères, indicateurs et vérificateurs pour l'évaluation.....	18
Figure 4. Principes du calcul d'impacts intermédiaires puis finals.....	24
Figure 5. Hiérarchie des référentiels de communication environnementale	29
Figure 6. Caractérisation d'un système par ses relations avec des éléments internes et externes (AFIS, 2004).....	35
Figure 7. Sphères contenant les systèmes (Plumecocq, 2013).....	36
Figure 8. Niveaux de modélisation d'un système	38
Figure 9. Représentation générale d'un processus (AFIS, 2004).....	43
Figure 10. Cadre de modélisation GERAM	48
Figure 11. Interaction cycle de vie procédé et produit (Bauer et Maciel Filho, 2004).....	53
Figure 12. Cycle de vie de l'huile d'olive	60
Figure 13. Répartition géographique des études d'ACV relatives à l'huile d'olive	65
Figure 14. Pyramide des systèmes dans une entreprise (inspiré de Heintz <i>et al.</i> (2014))	80
Figure 15. Approche systémique orientée modèle	82
Figure 16. Portée de l'approche proposée dans un modèle de système d'entreprise	86
Figure 17. Approche P ² E et processus de décision	87
Figure 18. Structure globale de l'approche P ² E	89
Figure 19. Diagramme d'activité de l'approche P ² E avec les informations nécessaires	92
Figure 20. Structure du système d'entreprise et des processus qu'il contient.....	94
Figure 21. Vues internes de l'entreprise (inspiré de (Vernadat, 1999)).....	96
Figure 22. Vue informationnelle, modèle d'information (Gillani, 2013).....	97

Figure 23. Vue des ressources	98
Figure 24. Vues d'interface (ajouter les limites de l'environnement et du système).....	99
Figure 25. Conversion des données.....	103
Figure 26. Transformation des critères.....	105
Figure 27. Classes et relations entre les classes	109
Figure 28. Structure du système d'entreprise agro-industrielle	114
Figure 29. Calcul des facteurs de pondération sociaux (ou facteurs de dommage)	123
Figure 30. Calcul du critère de viabilité économique.....	126
Figure 31. Calcul de la pertinence de l'étude.....	127
Figure 32. Structure générale de l'outil &cOlive.....	130
Figure 33. Objets d'&cOlive et étape de P ² E.....	131
Figure 34. Fenêtres de démarrage de l'outil.....	133
Figure 35. Présentation de la boîte de dialogue.....	134
Figure 36. Données d'ingénierie à saisir	135
Figure 37. Données environnementales à saisir	136
Figure 38. Données économiques à saisir	137
Figure 39. Données sociales à saisir.....	138
Figure 40. <i>Flowsheet</i> du procédé d'extraction de l'huile d'olive vierge.....	141
Figure 41. Exemple de tableau de bord.....	143
Figure 42. Chapitre 10 et approche P ² E	151
Figure 43. Chapitre 11 et approche P ² E	155
Figure 44. Système global de production d'huile d'olive.....	156
Figure 45. Procédé discontinu d'extraction	162
Figure 46. Procédé continu d'extraction	163
Figure 47. Chapitre 12 et approche P ² E	169

Figure 48. Statistiques sur les pratiques culturelles oléicoles en France (Leverge, 2011)	170
Figure 49. Comparaison entre la répartition des cas d'étude et celle de l'ensemble des moulins de France en fonction de la technique d'extraction de l'huile utilisée	172
Figure 50. Comparaison entre la répartition des cas d'étude et celle de l'ensemble des moulins de France en fonction de la technique de traitement des grignons utilisée.	172
Figure 51. Chapitre 13 et approche P ² E	179
Figure 52. AeCV et AcCV de la production d'huile d'olive vierge, scénario moyen, impacts intermédiaires	181
Figure 53. Résultats d'AeCV et d'AcCV pour la phase oléicole, scénario moyen, impacts intermédiaires	182
Figure 54. Résultats d'AeCV et d'AcCV pour la phase industrielle, scénario moyen, impacts intermédiaires	185
Figure 55. Influence de la durée de la pépinière	186
Figure 56. Influence de la durée de vie du système	187
Figure 57. Influence de la durée de vie moyenne des infrastructures	188
Figure 58. Influence des rendements d'extraction	189
Figure 59. Comparaison des scénarios de production d'huile d'olive vierge a) résultats pour le score unique d'impact environnemental et b) pour les coûts du cycle de vie	195
Figure 60. Page d'accueil de l'outil OiLCATool	265
Figure 61. Étiquette de type II proposée aux professionnels du secteur	266

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison durabilité forte/faible extrait de (Mancebo, 2010)	11
Tableau 2. Moyens pour aider à la durabilité d'un projet (en orange), d'un produit (en vert), d'une organisation (en bleu) et d'une communauté (en violet) (inspiré de (UNEP, 2009))	16
Tableau 3. Cadre méthodologique de l'AdCV (Swarr <i>et al.</i> , 2011).....	28
Tableau 4. Classification des qualités et défauts sensoriels des huiles d'olives (Veillet, 2010).....	59
Tableau 5. Comparaison des systèmes d'extraction de l'huile d'olive (Veillet, 2010).....	62
Tableau 6. Caractéristiques générales des études d'ACV relatives à l'huile d'olive	67
Tableau 7. Caractéristiques des données	70
Tableau 8. Indicateurs sélectionnés pour caractériser la durabilité	118
Tableau 9. Facteurs de conversion des données sociales d'inventaire en impacts intermédiaires	120
Tableau 10. Facteurs de dommage retenus pour l'AeCV et l'AsCV	124
Tableau 11. Facteurs de normalisation et de pondération environnementaux et sociaux (Hauschild <i>et al.</i> , 2012).....	125
Tableau 12. Comparaison des différentes techniques de récolte des olives (Veillet, 2010)	159
Tableau 13. Scénarios des pratiques oléicoles	165
Tableau 14. Scénarios d'extraction d'huile	166
Tableau 15. Scénarios de fin de vie des bouteilles	166
Tableau 16. Scénarios analysés dans la bibliographie.....	167
Tableau 17. Scénarios du système de production d'huile d'olive vierge	168
Tableau 18. Caractéristiques des entreprises de production d'olives	171
Tableau 19. Questionnaires retenus pour les calculs d'inventaire concernant les moulins	172
Tableau 20. Données saisies qui définissent le scénario moyen	173
Tableau 21. Résultats de l'évaluation technique et de l'incertitude moyenne sur les données d'entrée	180

Tableau 22. Simulation de Monte Carlo pour l'AeCV, scénario moyen, catégories intermédiaires	190
Tableau 23. Résultats de l'AsCV par sous-catégorie d'indicateurs, scénario moyen	191
Tableau 24. Résultats de l'évaluation économique, scénario moyen	192
Tableau 25. Résultats de dommages sociaux sur les catégories de parties prenantes	194
Tableau 26. Résultats de la durabilité des scénarios retenus	198
Tableau 27. Verrous, propositions et état actuel	207
Tableau 28. Coefficients d'amortissement dégressif (Ministère de l'Économie et des Finances, 2012).....	238

Liste des équations

Équation 1. Calcul d'impact (Jolliet <i>et al.</i> , 2010)	100
Équation 2. Variance à 95 % pour l'analyse de la qualité des données	121
Équation 3. Incertitude sur les données	122
Équation 4. Conservation de la masse dans les grignons	174
Équation 5. Conservation de la masse dans les grignons dans Olive	174
Équation 6. Somme des fractions massiques dans les margines	175
Équation 7. Conservation de l'eau.....	175
Équation 8. Conservation de la matière sèche.....	175
Équation 9. Conservation de la matière grasse.....	176
Équation 10. Production totale d'huile d'olive vierge.....	176
Équation 11. Calcul de flux par unité fonctionnelle.....	177
Équation 12. Calcul du coefficient d'amortissement dégressif.....	238
Équation 13. Calcul du bénéfice brut	238
Équation 14. Calcul du taux d'actualisation	239
Équation 15. Calcul des annuités de remboursement de l'emprunt.....	239
Équation 16. Calcul du bénéfice actualisé.....	239
Équation 17. Calcul du temps de retour sur investissement.....	240
Équation 18. Calcul du taux de rentabilité interne	240

Depuis l'ère industrielle, la population humaine a cru exponentiellement pour atteindre une taille telle que son action revêt désormais une dimension planétaire. Les causes d'une telle explosion démographique se trouvent en grande partie dans les améliorations médicales, technologiques et sanitaires, fruits de l'avènement de la science et de l'ingénierie. Néanmoins, ces avancées continuent de reposer sur une consommation de ressources naturelles renouvelables et non-renouvelables et sur l'émission de polluants dans l'environnement. Sans préjuger de la valeur morale de ces progrès, force est de constater qu'ils ont engendré des conséquences inquiétantes sur l'environnement telles que le dérèglement climatique, l'épuisement des ressources ou encore l'effondrement de la biodiversité. Or que ce soit pour sa survie biologique, pour la survie de ses activités économiques ou pour le maintien de la paix au sein de chaque société et entre les sociétés, l'humanité dépend directement de ces phénomènes géologiques, biologiques, chimiques et physiques. Parallèlement, l'accentuation de la répartition inégale des ressources économiques et écologiques entre les peuples et entre les individus mènent à des tensions sociales parfois violentes. En outre, des questions éthiques profondes sont soulevées quant à la légitimité de tels écarts, en particulier quand les conditions de travail de certains ne traduisent pas le respect d'une dignité universelle et commune à tous les êtres humains. De cette crise planétaire à trois facettes interdépendantes a émergé la nécessité de la durabilité.

Face à ce nouvel objectif qui s'impose à l'humanité, toutes les ressources humaines, leur intelligence et la technologie qui la supporte doivent être mises à contribution. L'ingénierie à l'origine de la technologie semble jouer un rôle primordial dans la résolution de cette crise, notamment par tous les outils et méthodes qu'elle peut concevoir et qui permettent, entre autres, d'optimiser les quantités d'énergie et de matière consommées au cours du cycle de vie des produits et des procédés. Par ailleurs, l'ingénierie offre la possibilité de développer des approches d'aide à la décision pour des problèmes complexes multi-objectifs ou multicritères, comme ceux auxquels sont confrontés les décideurs. Par sa transversalité, l'ingénierie semble bel et bien pouvoir proposer des solutions pour la durabilité, tant au niveau de l'organisation et de l'ordonnancement des ressources humaines qu'au niveau de la conception de systèmes technologiques durables. En outre, elle se retrouve dans quasiment tous les domaines de l'activité humaine, tels que l'industrie et notamment l'agro-industrie. Elle trouve également son essence au cœur de l'entreprise qui en est également l'objet.

Concrètement, la complexité des systèmes sociotechniques qui composent la société dans son ensemble se traduit par des besoins accrus en caractérisation et modélisation et ce, quelle que soit la phase du cycle de vie du système à concevoir. À ce titre, la recherche scientifique et l'ingénierie travaillent de pair à formaliser et à utiliser des modèles des systèmes réels dans le but d'en prévoir les comportements et de les maîtriser davantage. Avec le développement des systèmes d'information et leur pénétration dans toutes les activités humaines, des disciplines nouvelles comme l'ingénierie d'entreprise et des systèmes d'information ont émergé à la fin du XX^{ème} siècle. Par leur généralité, tout porte à croire qu'elles peuvent fournir un formalisme en théorie utilisable dans tous les domaines de l'activité humaine et ainsi aider à la description toujours plus précise du monde. Dans les faits, chaque domaine ou presque a développé un formalisme singulier *a priori* optimisé au fil de l'histoire pour faire face aux problèmes rencontrés. Si dans le contexte de la durabilité, l'intérêt d'intégrer les modèles de tous les sous-systèmes qui composent un système paraît évident pour prévoir ses évolutions et le rendre agile face à un environnement économique, écologique et social en perpétuel mouvement, une telle intégration demeure un challenge scientifique tant les modèles et les formalismes sur lesquels ils reposent ne sont pas interopérables. En outre, des modèles d'interaction avec le milieu extérieur doivent également être intégrés afin d'évaluer les conséquences du système sur son environnement économique, écologique et social. L'approche dite « procédé-produit » constitue un exemple d'intégration du domaine du génie des procédés avec celui de l'analyse environnementale du cycle de vie d'un produit. Elle intègre un modèle de produit, un modèle d'évaluation des impacts environnementaux et un modèle de procédé. Afin de continuer cet effort d'intégration, de nombreuses approches doivent désormais être recherchées pour aider les responsables d'un métier, quel que soit leur niveau de hiérarchie et leur domaine métier, à prendre des décisions dites durables sur la base d'un ensemble de modèles intégrés.

Dans ce contexte sociétal et scientifique, le Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA) et le département des Procédés et Systèmes Industriels (PSI) du Laboratoire de Génie Chimique (LGC) collaborent depuis 2009 afin de réaliser des projets orientés vers l'intégration des modèles et des méthodes. Fort de sa connaissance des systèmes agro-industriels et du devenir environnemental des constituants, le LCA met en commun son expérience avec le LGC qui, pour sa part, apporte des savoir-faire en ingénierie des procédés et des systèmes industriels. Leur collaboration a déjà abouti au développement d'une approche intégrée de conception de procédé et d'analyse environnementale de cycle de vie (Gillani, 2013) ou encore à celui d'une approche systémique et d'aide à la décision pour la substitution de produits (Heintz, 2012). Les travaux de thèse présentés dans ce

manuscrit s'inscrivent dans cette lignée de projets entre le LCA et le département PSI du LGC. Ils s'articulent autour du projet européen OiLCA du programme communautaire Interreg IV SUDOE qui vise à améliorer la compétitivité du secteur de l'huile d'olive tout en réduisant l'empreinte carbone à travers l'optimisation de la gestion des déchets et la mise en place d'une étiquette écologique (OiLCA, 2011). Afin de répondre à cet objectif, nous développons et proposons ici une approche procédé-produit-entreprise (P²E) d'évaluation de la durabilité des systèmes guidée par la pensée cycle de vie puis appliquée à l'agro-industrie oléicole.

Le présent manuscrit est divisé en quatorze chapitres rassemblés dans trois parties. Elles sont précédées de cette partie introductive puis suivies d'une conclusion générale accompagnée de perspectives.

La première partie consiste à établir avec précision le contexte sociétal et scientifique dans lequel s'inscrit la thèse développée notamment à travers un état de l'art des trois principaux thèmes abordés. Ainsi, dans un premier temps, le développement durable et ses limites sont discutés. Ensuite, les outils et méthodes qui permettent la durabilité sont présentés avec une attention particulière portée sur l'analyse multicritère et l'analyse du cycle de vie. Le chapitre suivant décrit l'ingénierie d'entreprise pour la durabilité des systèmes et tous les concepts connexes sur lesquels va reposer le développement de l'approche. Le quatrième et dernier chapitre de cette partie dresse un portrait du secteur oléicole. De cette partie vont émerger un certain nombre de verrous scientifiques que l'approche va proposer de lever.

La deuxième partie du manuscrit constitue le cœur de la thèse en ce qu'elle définit l'approche de manière formelle. Le premier chapitre de cette partie reprend les verrous scientifiques mis en exergue dans la première partie pour démontrer la nécessité de l'approche. Ensuite, cette dernière est caractérisée par les concepts de l'ingénierie d'entreprise et des systèmes. Le troisième chapitre détaille la caractérisation partielle de l'approche P²E appliquée au domaine de l'agro-industrie. Le quatrième chapitre décrit le développement d'un prototype logiciel supportant l'approche P²E. Cette solution est particulièrement adaptée aux systèmes agro-industriels comme la production d'huile d'olive, objet d'étude du projet OiLCA. Finalement, cette deuxième partie s'achève par une conclusion sur l'approche et sa capitalisation.

La troisième et dernière partie de ces travaux illustre l'intérêt de l'approche par son application à la production d'huile d'olive vierge. Sa structure est inspirée de celle de l'approche P²E. Ainsi, un premier chapitre définit les objectifs et le champ de l'étude d'évaluation de la durabilité. La modé-

lisation du système « procédé-produit-entreprise » fait l'objet du deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre sont présentées les différentes approches de récoltes et de calcul des données d'inventaire. Le quatrième chapitre analyse et donne une interprétation des résultats d'évaluation de la durabilité du système de production d'huile d'olive. Finalement, une discussion et la mise en exergue des limites de l'étude clôt cette partie.

Partie A. Contexte scientifique & état de l'art

La première partie de cette thèse propose d'établir le contexte scientifique dans lequel elle s'inscrit à travers un état de l'art des thèmes abordés.

Actions de dissémination liées à cette partie :

(Busset *et al.*, s.d.) *Life cycle assessment of olive oil: a literature review*. International Journal of Life Cycle Assessment (soumis).

(Quintana *et al.*, s.d.) *Review on Social Life Cycle Assessment*. International Journal of Life Cycle Assessment (soumis).

(Busset *et al.*, 2012f) *L'étiquetage environnemental, l'empreinte carbone et la production d'huile d'olive*, Journée thématique Techno'huile : « Qualité des huiles d'olive : nouveaux indicateurs chimiques et contaminants », Montpellier, France.

(Busset *et al.*, 2013a) *Life cycle analysis : Reminder and application to olive oil* Symposium on ecoinnovation in the SUDOE region, Toulouse, France.

Chapitre 1. Du développement durable à la durabilité

À l'heure où le concept de développement durable est galvaudé, qu'en est-il vraiment de sa signification ? Est-il si pertinent ? Qui concerne-t-il et quels enjeux soulève-t-il ?

1.1 Histoire du développement durable

1.1.1 Le développement

Bien que présentant diverses définitions selon le domaine, le développement correspond au fait de s'étendre et de croître (inspiré de Larousse, (2013)). Le concept demeure récent à l'échelle de l'histoire de l'humanité. En effet, son apparition sur la scène médiatique peut être datée de 1949, lors du discours d'investiture de Truman dans lequel il introduit l'expression « pays sous-développés » par opposition implicite aux pays développés tels que les États-Unis (Rist, 2001). Ce discours repose sur un ensemble de présupposés idéologiques. Le développement constitue un chemin unique et commun qu'emprunte inéluctablement l'ensemble des peuples de la terre. Les pays occidentaux et particulièrement les États Unis se positionnent comme les pays les plus avancés sur ce chemin. Par philanthropie et pour des principes humanistes, ils offrent une aide technique et économique aux autres pays du monde. Cette notion de développement indissociable du concept et de l'évidence du progrès apporte un salut naturel et universel à l'humanité et une foi en un avenir toujours meilleur (Taguieff, 2001).

En outre, le développement tel qu'il est compris et utilisé reste indissociable de la notion de croissance économique basée sur la consommation de ressources naturelles (Couillet-Demaizière, 2010). En termes de capitalisme, le développement passe par la substitution du capital naturel en capital construit (Mancebo, 2010). Selon les idéologies, il est question de considérer l'existence ou non d'un capital naturel critique et, le cas échéant, de mesurer et quantifier ce capital critique (Vivien *et al.*, 2013). Par ailleurs, la notion même de développement peut être discutée.

1.1.2 L'écologie et la systémie

Au début des années 70, la société industrialisée a atteint un tel niveau de développement économique, scientifique et technologique, que l'influence de l'humanité sur la planète a pris une ampleur jusqu'alors inconnue. Les premiers constats de dégradations préoccupantes de l'environnement soulèvent de sérieuses inquiétudes et amènent certains penseurs à s'interroger sur le fondement, la pertinence et la pérennité du modèle de société basé sur l'économie de marché, la

croissance infinie et la rationalisation totale de la vie. Par environnement est entendu la nature comme « fait écologique » pour reprendre l'expression de Berque (Vivien *et al.*, 2013). Il ne s'agit pas ici de l'idée de nature représentée différemment selon les cultures (Vivien *et al.*, 2013).

À cette même époque, le club de Rome formé de diverses personnalités du monde économique et politique commande au *Massachusetts Institute of Technology* une étude sur les limites de la croissance économique sur une planète finie. L'équipe dirigée par Meadows rédige alors un rapport en 1972 intitulé *Halte à la croissance*. Cet ouvrage marque un tournant dans l'histoire du développement durable en ce qu'il constitue le premier signal d'alarme sur le mode de développement proposé par la société de consommation. La prise de conscience des problèmes écologiques lance une vague de développement plus respectueux de l'environnement jusqu'au fameux rapport Brundtland de 1987 (Jounot, 2004).

Durant cette même période et en lien direct avec la mise en évidence des problématiques écologiques et sociales des années 60, Joël de Rosnay propose, dans *Le Macroscop*, un outil théorique éponyme mais surtout pratique et applicable à travers lequel un regard nouveau peut être posé sur la vie en général, de l'écologie à l'économie, en passant par la biologie (De Rosnay, 1977). Grâce au macroscop, il est possible d'intégrer ces domaines et de les voir sous un angle nouveau, celui de l'« approche systémique ». L'auteur développe également les concepts d'énergie, d'information et de temps sous un regard macroscopique qu'il considère comme « les éléments éternels dont dépend notre action ». Enfin, l'ensemble de sa réflexion aboutit à une ouverture sur un changement profond des valeurs de la société humaine. Cet ouvrage phare pour lequel l'auteur a reçu le prix de l'Académie des Sciences Morales et Politiques en 1975 mérite une attention particulière en ce qu'il esquisse la notion d'intégration qui sera discutée ultérieurement dans le présent manuscrit. La première moitié du XX^{ème} siècle a été consacrée à l'analyse et au développement des modèles élémentaires de tout ce qui pouvait être soumis à la méthode analytique. L'heure serait peut-être à la reconnaissance et à la modélisation des liens entre les différentes briques de connaissance issues de l'ingénierie, de l'économie et des sciences humaines et sociales et à leur intégration selon une méthode systémique.

Parallèlement ont été créés le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (*United Nations Development Program*) (UNDP) en 1966 et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) (*United Nations Environment Program*) (UNEP) en 1972. Ces deux organismes de l'Organisation des Nations Unies (ONU) sont depuis étroitement liés en reconnaissant le lien intime entre environnement et développement (Mancebo, 2010).

Par ailleurs, les catastrophes industrielles et leurs conséquences sur les hommes (Seveso, Bhopal, Tchernobyl, Toulouse, Fukushima, etc.) ont amené la société à évaluer et prévenir les risques (Perdreau et Thomas, 2012).

Des années 60 au début des années 80, l'humanité avec son développement et les conséquences de ses actions sur la nature et sur elle-même commence à réfléchir sérieusement à sa responsabilité. L'accroissement manifeste des inégalités entre les êtres humains vient s'ajouter à la réflexion pour finalement mener « naturellement » à la notion de développement durable. Cette évolution de l'humanité s'est traduite dans l'organisation des sociétés par l'évolution des réglementations liées à l'environnement et la sécurité. Basées sur une approche curative dans les années 60 à 80, les mesures réglementaires sont devenues préventives dans les années 80 à 2000 pour finalement s'orienter vers une approche intégrée (Perdreau et Thomas, 2012). Toutes ces mesures tentent d'encadrer les activités de l'être humain.

1.2 Discussion sémantique

1.2.1 Le développement durable

1.2.1.1 Définition

Avant de confronter les différentes définitions du développement durable (*sustainable development*) et après avoir donné une définition simple du développement dans le sous-chapitre précédent, il paraît logique de s'entendre sur une définition du concept de durabilité (*sustainability*). La durabilité caractérise la propension à s'étendre dans le temps. Ce qui est durable présente une certaine stabilité temporelle (Larousse, 2013). La durabilité, notamment d'un objet, n'est pas absolue mais relative à des objectifs préalablement définis. Elle dépend des échelles de temps et d'espace considérées. En outre, l'utilisation du terme durable peut qualifier soit la durabilité propre d'un objet ou d'un être, soit sa contribution à la durabilité d'un autre objet ou d'un autre être.

D'aucun ne saurait désormais aborder le concept du développement durable sans se référer à la définition historique proposée dans le rapport Brundtland, à savoir « un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (CMED, 1987). Le développement durable est un développement économiquement efficace, environnementalement soutenable et socialement équitable.

Lorsqu'il est question de développement durable, la notion d'équité revient inévitablement. Par équité, il faut comprendre « caractère de ce qui est fait avec justice et impartialité » (Larousse, 2013). Ainsi, l'équité du développement durable possède, d'une part, une dimension temporelle en s'appliquant aux différentes générations, d'autre part, une dimension spatiale en s'appliquant aux différents peuples et écosystèmes répartis sur la planète. Il est également question de viabilité au sens de ce qui peut durer ou exister (Larousse, 2013). Elle met en balance l'environnement et l'économie et se caractérise par l'éco-efficience (ou éco-efficacité) définie comme la relation entre le bénéfice économique et l'impact environnemental (Weidenhaupt et Meier, 2000). Finalement, la dernière bissection entre deux des trois domaines du développement durable correspond à ce qui est vivable, entendu comme ce qui peut exister, vivre commodément (Larousse, 2013). La représentation la plus classique du développement durable est l'interaction des sphères de développements économique, environnemental et social (Figure 1).

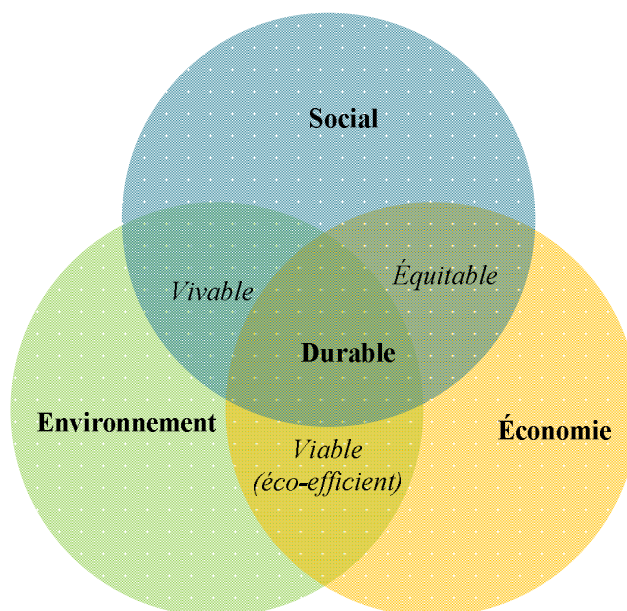


Figure 1. Représentation du développement durable (Mancebo, 2010)

André *et al.* proposent également une vision du développement durable qui comporte trois dimensions : environnementale, économique et sociale. « La dimension environnementale est une condition du développement, la dimension économique en est le moteur et le développement social s'avère la finalité » (André *et al.*, 2007). Une telle vision concilie – réconcilie – les trois sphères souvent opposées. Les auteurs insistent sur l'existence nécessaire de plusieurs modèles de développement durable, ce dernier dépendant des conditions environnementales, sociales, économiques, culturelles et technologiques de la zone géographique en question (André *et al.*, 2007).

Dans son ouvrage, Mancebo caractérise le concept de développement durable en utilisant la notion de durabilité faible ou durabilité forte (Mancebo, 2010). Il compare les deux caractéristiques du développement durable dans le tableau 1. Il convient de noter que la durabilité ici semble caractériser le développement. Dans le paragraphe suivant, la durabilité est discutée et élargie à d'autres objets. Cette notion de durabilité faible ou forte aura des conséquences importantes sur les décisions finales qui pourront être prises. La notion de durabilité forte/faible est également présentée et discutée dans l'ouvrage de Vivien *et al.* (2013).

Tableau 1. Comparaison durabilité forte/faible extrait de (Mancebo, 2010)

	Idée-clé	Conséquence	Terme clé	Enjeu du développement durable
Durabilité forte	Capital naturel et capital construit peuvent être substitués de manière parfaite	Certaines actions humaines conduisent à des irréversibilités	Capital naturel critique	Préserver les stocks de capital naturel irremplaçable
Durabilité faible	Capital naturel et capital construit sont parfaitement substituables	La somme du capital naturel et du capital construit doit être maintenue constante	Allocation optimale des ressources	Trouver des solutions techniques dites « propres » pour remplacer produits et procédés, ou restaurer l'environnement

1.2.1.2 Critique

Concernant les limites du concept, Jacques Blamont va jusqu'à qualifier le développement durable de « non-sens à l'échelle planétaire car il n'est pas compatible avec les ressources naturelles dont nous disposons » (Coullet-Demaizière, 2010). En effet, sur une planète aux limites finies, un développement durable, c'est-à-dire une croissance indéfinie de la population ou de l'économie basée sur la croissance des flux matériels et énergétiques s'avère un non-sens d'un point de vue physique. En revanche, le développement durable de la complexité, de l'organisation des sociétés ou encore de la vie apparaît sensé. D'un tel constat s'impose la question de la nécessité d'un changement de paradigme et de nos modes de penser qui infléchirait la croyance en la sacro-sainte croissance économique comme solution à tous les maux de la société et en remettant en question la foi en un progrès infini et en la technologie comme réponse aux problèmes humains.

1.2.2 Au-delà du développement durable

1.2.2.1 La société durable

Hallsdet *et al.* reprennent un consensus scientifique sur les 4 principes de la durabilité : « dans une société durable, la nature n'est pas sujette à une augmentation systématique (i) des concentrations de substances extraites de la croûte terrestre, (ii) des concentrations des substances produites par la société (iii) de la dégradation des moyens physiques. Enfin, dans cette société les gens ne sont pas sujets à des conditions qui amoindrissent leur capacité à subvenir à leur besoins » (traduit d'Hallstedt *et al.* (2010)). Il convient de relever le fait que les générations futures n'entrent pas explicitement en ligne de compte dans ces 4 principes. Il est question ici de société durable et de durabilité et non de développement ce qui semble plus réaliste.

1.2.2.2 L'épanouissement durable

Dans *Au-delà de l'écologie* (Couillet-Demaizière, 2010), l'astrophysicien parle d'« épanouissement durable ». Or l'épanouissement se définit comme le fait « d'être en pleine possession de ses facultés, d'être heureux, comblé » (Larousse, 2013). Ainsi, plus que le développement, l'épanouissement sous-tend l'objectif de bonheur. Le développement durable ne semble pas compatible avec l'épanouissement durable. La notion d'épanouissement durable s'avère constituer un objectif à atteindre. En outre, elle intègre les besoins de bonheur – liés à la spiritualité – qui participent à l'épanouissement des individus.

Bien que la notion de développement durable soit discutable et discutée et qu'elle soit évincée au profit de l'objectif de société ou d'épanouissement durable, elle n'en demeure pas moins pensée et mise en œuvre par des parties prenantes aux besoins multiples et divergents. Il paraît donc indispensable de définir les parties prenantes.

1.2.3 Parties prenantes

La définition de « parties prenantes » peut être reprise du domaine de l'ingénierie système : « Toute personne ou entité concernée de près ou de loin par le système, son utilisation, sa réalisation ou sa maintenance et donc susceptible d'exprimer des exigences (besoins et contraintes) » (Ménadier, 2003). Les besoins sont entendus comme « la nécessité ou le désir exprimé par un utilisateur, ou par toute partie intéressée par l'utilisation et l'exploitation du système » et les contraintes correspondent à des limitations pesant sur le système ou ses processus et réduisant

la liberté du concepteur (Ménadier, 2003). Cette notion dépasse la notion d'« acteur » puisque des personnes ou entités intéressées par le fonctionnement d'un système peuvent l'être simplement par les conséquences de son utilisation et non par la fonction première dudit système.

L'UNEP dans son guide pour l'analyse sociale du cycle de vie reprend le schéma de Hub et Spoke publié dans un article de Bowie en 2002 qui représente les différentes classes de parties prenantes liées à un produit commercial (Figure 2) (UNEP, 2009).

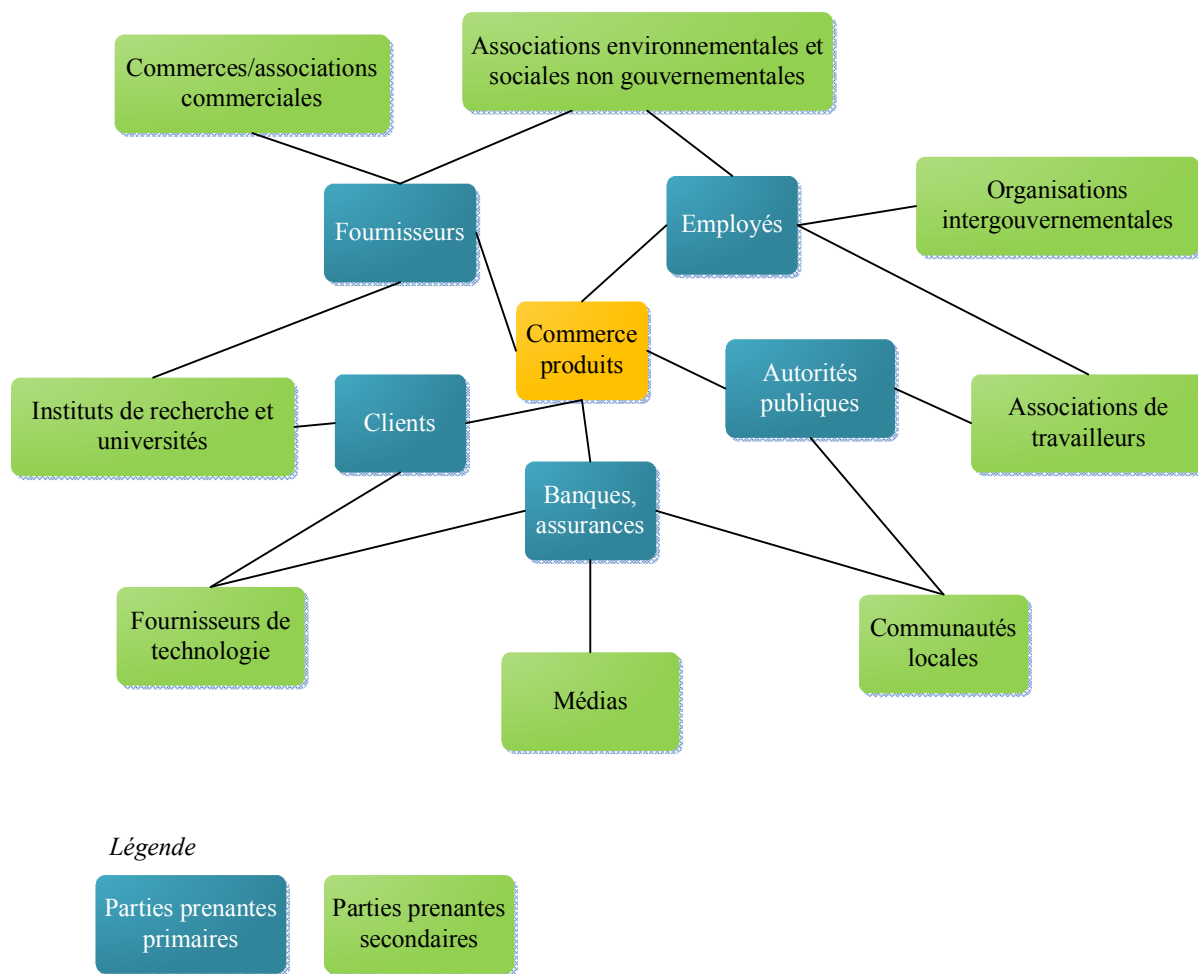


Figure 2. Diagramme de Hub et Spoke (UNEP, 2009)

Dans ce diagramme, il est question des parties prenantes primaires, c'est-à-dire des parties prenantes directement liées à l'existence du produit et de l'activité commerciale connexe, et des parties prenantes secondaires, à savoir les acteurs qui subissent des impacts indirects liés au commerce et au produit en cause. Cette vision centrée sur un commerce ou un produit peut être généralisée et centrée sur un service. D'ailleurs tout produit ou procédé ne rend-il pas un service ?

L'entreprise, la société civile, les collectivités territoriales, les individus, la nature, les Organisations Non Gouvernementales (ONG), les politiques sont des parties prenantes. Par leur nature, leur taille et leurs intérêts différents, l'ensemble des parties prenantes apporte un nombre très important de points de vue et de contraintes qu'il faut intégrer à toute solution développée. Cette myriade d'intérêts confère au développement durable différents enjeux économiques, environnementaux et sociaux qui souvent s'opposent.

Si le débat sur le concept de durabilité reste ouvert, l'objectif de durabilité semble s'imposer. Afin d'aider à l'atteinte de cet objectif, de nombreux outils et méthodes existent.

Chapitre 2. Outils & méthodes pour la durabilité

Un outil est défini comme « un élément d'une activité qui n'est qu'un moyen, un instrument » et une méthode comme « un ensemble ordonné de manière logique de principes, de règles, d'étapes, qui constitue un moyen pour parvenir à un résultat » (Larousse, 2013). Ainsi, des outils et des méthodes durables seront par définition des moyens pour aider à l'atteinte de la durabilité d'un produit (ou d'un procédé ou d'un service), d'un projet, d'un organisme ou d'une communauté. Les moyens peuvent être communs à ces différents systèmes, spécifiques à l'un des systèmes ou même adaptés à un représentant de l'un des systèmes.

Considérant que viser la durabilité impose d'intégrer les domaines économiques, sociaux et environnementaux, l'utilisation de moyens analytiques sera nécessairement complétée par celle de moyens de couplage et d'intégration mais également par des moyens technologiques. Se pose alors la question de savoir si cette nouvelle perspective de durabilité induit l'élaboration de nouveaux moyens ou si elle ne correspond qu'à un rassemblement de moyens existants propres aux trois domaines susmentionnés. Quelle que soit la réponse, l'ingénieur semble être le plus à même de jouer le rôle d'intégrateur.

Il semblerait que la discipline de la « durabilité » crée des outils et méthodes qui permettent de puiser des informations dans toutes les disciplines afin de confronter ces dernières les unes aux autres par des analyses multicritères. Ainsi, les moyens pour la durabilité doivent nécessairement être systémiques et d'intégration. L'expert « durabilité » ne remplacera pas l'expert procédé ou logistique par exemple, mais il apportera une approche globalisante du système et une vision supplémentaire sur les conséquences des différents choix. Ainsi, on peut considérer que toutes les activités connues de l'humanité peuvent être requalifiées à la lumière de la durabilité.

2.1 Typologie

Les moyens (outils ou méthodes) peuvent être analytiques, procéduraux et de gestion, de contrôle, de communication ou pour la rédaction d'un support. Ils peuvent s'appliquer à quatre niveaux : projet (ou intervention ou établissement), produit, organisation ou communauté (UNEP, 2009). Ils se déclinent ensuite selon les trois aspects de la durabilité : social, environnement et économique. La liste des moyens d'analyse environnementale des systèmes est confirmée par l'article de revue de Finnveden et Moberg (2005) (Tableau 2).

Tableau 2. Moyens pour aider à la durabilité d'un projet (en orange), d'un produit (en vert), d'une organisation (en bleu) et d'une communauté (en violet) (inspiré de (UNEP, 2009))

Catégories de moyens	Environnement	Économie	Social	Durabilité
Moyens analytiques	<p>Évaluation Environnementale Stratégique, Évaluation des Impacts sur l'Environnement</p> <p>Analyse environnementale du cycle de vie, Bilan Carbone</p> <p>Empreinte environnementale, évaluation environnementale interne, <i>Mass Flow Analysis</i></p> <p>Écologie industrielle</p>	<p>Analyse économique du cycle de vie (analyse du cycle des coûts), <i>Activity Based Costing</i></p> <p>Empreinte économique, bilan comptable</p>	<p>Évaluation des impacts sociaux, Évaluation des Répercussions sur la Santé, Évaluation des Risques pour la Santé,</p> <p>Analyse sociale du cycle de vie, évaluation des choix technologiques</p> <p>Responsabilité Sociale, Évaluation de la chaîne de valeur, analyse des réseaux de valeurs, empreinte sociale, outils d'auto-évaluation</p> <p>Normes et certification : <i>Social Accountability (SA) 8000</i>, <i>Fair Trade</i>, série de normes <i>AccountAbility (AA)1000</i>, norme européenne de qualité pour l'investissement socialement responsable, <i>Occupational Health and Safety Assessment Standard (OHSAS) 18001</i></p> <p>Lignes directrices : <i>Sustainability-Integrated Guidelines for Management</i>, principes directeurs de l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE), <i>BS 8900</i>, <i>International Standard on Assurance Engagements 3000</i></p> <p>Mesure de la performance : tableau de bord prospectif, cadre d'évaluation de la <i>European Foundation for Quality Management</i>, <i>Investors in People</i></p> <p>Recherche-action, Analyse de l'agro-écosystème, recherche sur les systèmes d'exploitation agricole, évaluation rurale rapide, entretiens semi-directifs et ouverts, enquêtes, groupes de discussions, entretiens dirigés, empreinte sociale</p>	<p>Analyse de la durabilité du cycle de vie</p> <p>Évaluation de la Durabilité</p>
Moyens procéduraux ou de gestion	<p>Gestion du cycle de vie, Normes « International Standard Organisation » (ISO) 14040 et 14044, Écoconception</p>	<p>Gestion du cycle de vie</p>	<p>Gestion du cycle de vie</p> <p>ISO 26000, SA 8000, OHSAS 18001</p>	<p>Agenda 21 locaux, SD 21000</p>
Moyens de contrôle	<p>Norme ISO 14067</p> <p>Audits environnementaux</p> <p>Audits environnementaux</p> <p>Évaluation</p>	<p>Audits économiques</p> <p>Audits économiques</p> <p>Évaluation</p>	<p>Suivi social</p> <p>Audits sociaux</p> <p>Audits sociaux</p> <p>Évaluation</p>	
Moyens de communications	<p>Certification</p> <p>Eco-étiquettes, label, normes ISO 14020-21-22-23-25</p> <p>Labellisation, indicateurs environnementaux</p> <p>Campagnes</p>	<p>Certification</p> <p>Indicateurs économiques</p> <p>Campagnes</p>	<p>Certification</p> <p>Éco-étiquettes, label</p> <p>Labellisation, Indicateurs sociaux</p> <p>Campagnes</p>	<p>Rapports sur le développement durable, indicateur de durabilité</p>
Moyens pour la rédaction de rapport	<p>Système politique</p>	<p>Système politique</p>	<p>Système politique</p>	<p>Système politique</p> <p><i>Global Reporting Initiative</i></p>

Il n'est pas possible de décrire tous les moyens d'aide à la durabilité dans l'exercice d'une thèse. Il faut donc procéder à une sélection.

2.2 Des critères & indicateurs

2.2.1 Analyse & évaluation

Parmi tous les moyens possibles, ceux d'analyse et d'évaluation apparaissent comme des moyens primordiaux dont les résultats s'avèrent nécessaires à la plupart des autres. En effet, les moyens de contrôle, de communication et de rédaction de rapport nécessitent les résultats des analyses et des évaluations pour être utilisés. Les moyens procéduraux et de gestion reposent quant à eux sur des évaluations qui ont permis de les élaborer. En tant que tel, ils n'utilisent pas les résultats des évaluations mais peuvent cependant préconiser la mise en œuvre de moyens d'évaluation. C'est ce caractère essentiel qui place les moyens d'analyse et d'évaluation au premier rang des moyens à étudier. Selon l'objet soumis à l'analyse et à l'évaluation (projet, produit, communauté, compagnie) et selon le volet à analyser et à évaluer (économique, environnemental ou social), différents moyens vont pouvoir être mobilisés (Tableau 2).

Il convient de dégager la différence entre analyse et évaluation bien que les deux termes soient largement utilisés l'un à la place de l'autre sans distinction particulière. L'analyse consiste par définition en la « décomposition d'une chose en ses éléments » (CNRTL, 2013). L'évaluation correspond quant à elle à l'action d'apprécier la valeur d'une chose. Elle est également une méthode d'estimation (CNRTL, 2013). Ainsi, à la lumière de leurs définitions respectives, l'analyse et l'évaluation demeurent clairement distinctes et apparaissent finalement complémentaires. L'évaluation nécessite l'analyse.

Afin d'évaluer une chose en fonction d'objectifs définis lors de l'identification des enjeux, il est nécessaire de choisir des critères (« élément de référence qui permet de juger, d'estimer, de définir quelque chose » (Larousse, 2013)) qui seront ensuite évalués par des indicateurs (« unité d'information, quantitative ou qualitative, qui sert d'outil pour mesurer de façon approximative la manifestation d'une réalité changeante » (Botreau et Veissier, 2013)). Ainsi l'évaluation apparaît-elle inextricablement liée à la notion de critères. Mendoza *et al.* précisent la définition de critère en ajoutant le concept de principe. Le critère est alors considéré comme un principe de second ordre qui précise un principe défini comme une vérité sur laquelle s'appuie un raisonnement ou une action (Mendoza et Macoun, 2000). Dans ces mêmes travaux, les auteurs explicitent le lien entre

indicateur et critère à travers la définition suivante : « variable ou composante du système étudié utilisée pour caractériser l'état d'un critère particulier ». Enfin, plus bas sur l'échelle de la généralité, la notion de vérificateur complète la liste des éléments clés à considérer dans une évaluation. Ils sont définis comme « une donnée ou une information qui renforce la spécificité ou la facilité d'évaluation d'un indicateur » (Mendoza et Macoun, 2000). La figure 3 présente l'organisation hiérarchique des différents éléments d'évaluation (principes, critères, indicateurs et vérificateur).

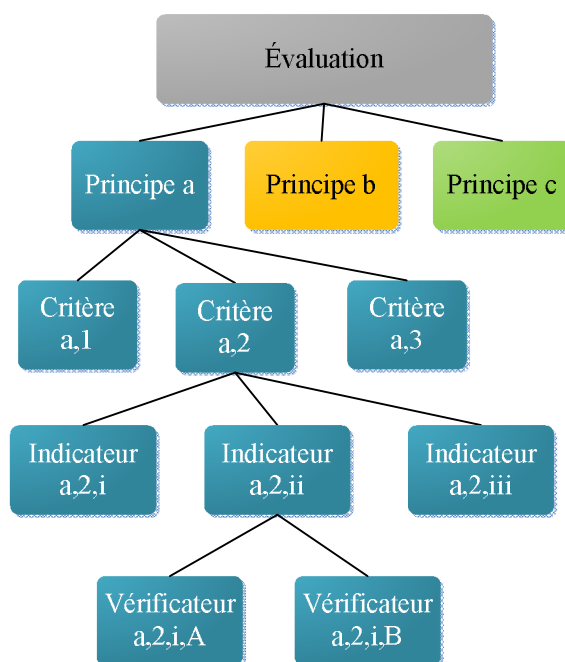


Figure 3. Organisation hiérarchique des principes, critères, indicateurs et vérificateurs pour l'évaluation

Évaluer la durabilité d'une chose implique nécessairement la prise en compte d'un grand nombre de critères caractérisant des enjeux et objectifs différents voire contradictoires, propres à chaque partie prenante. Le recours à l'analyse multicritère (AMC) (*multicriteria analysis*) s'impose alors naturellement.

2.2.2 Analyse multicritère

L'analyse multicritère se présente comme le couplage entre l'analyse et l'évaluation, cette dernière étant portée par la notion de critère. Elle est une méthode d'aide à la décision qui permet de comparer diverses alternatives pour répondre à un problème donné, à partir de critères dont les unités voire la nature (quantitative, semi-quantitative ou qualitative) diffèrent. Elle repose sur trois caractéristiques : un jeu donné d'alternatives, un jeu de critères pour comparer les alternatives et une méthode de classement des alternatives (WB, 2006).

Avant de sélectionner les critères et les indicateurs de l'AMC, il faut définir les objectifs de l'évaluation en fonction de la nature du problème à résoudre. Ce dernier porte soit sur la description d'une seule alternative, soit sur la comparaison de plusieurs alternatives. Dans le second cas, Botreau et Veissier (2013) distinguent trois types de problèmes : soit l'évaluation vise à définir la meilleure alternative à choisir, soit elle vise à établir un classement des alternatives, soit elle vise à trier les alternatives en les affectant à des catégories prédéfinies. La nature du problème va orienter le choix d'une méthode d'agrégation des critères.

Toute AMC peut être décomposée en quatre étapes qui consistent à (Ben Mena, 2000) :

- ✓ définir et lister les alternatives étudiées ;
- ✓ définir et lister les critères d'évaluation ;
- ✓ établir le tableau des performances qui permet de comparer les alternatives en fonction de tous les critères ;
- ✓ et agréger les performances, c'est-à-dire les différents critères d'une alternative donnée.

Si les trois premières étapes de l'AMC restent les mêmes quelle que soit la nature du problème, la dernière étape en revanche repose sur un grand nombre de méthodes qui en dépendent. Les méthodes en question peuvent être classées en deux groupes (Ben Mena, 2000) :

- ✓ les méthodes d'agrégation complète aussi appelées méthodes d'« agrégation complète transitive » telle que la somme pondérée. Ces méthodes présupposent que les indicateurs se compensent et présentent l'avantage d'être claire en offrant la possibilité d'obtenir un score unique ;
- ✓ les méthodes d'agrégation partielle qui consistent à comparer les différentes alternatives deux à deux et à déterminer celle qui surclasse l'autre. Ces méthodes qui permettent de conserver la non équivalence des indicateurs perdra en revanche en clarté.

Les méthodes d'agrégation complète ou partielle reconnues sont les méthodes ELECTRE, PROMETHEE, MACBETH, AHP, MAUT (Caillet, 2003).

Une fois l'analyse multicritère implémentée, des paramètres (opérateurs, technologiques, économiques, géographiques, etc.) qui influencent la valeur des critères peuvent être optimisés. L'étape ultime pour l'analyse, la simulation et l'évaluation d'un système est l'optimisation, à savoir un «

raisonnement ou un calcul permettant de trouver les valeurs d'un ou plusieurs paramètres qui correspondent au maximum d'une fonction » (CNRTL, 2013). Les méthodes d'optimisation sont multiples et réparties en deux groupes : celles qui reposent sur une programmation linéaire et celles qui reposent sur une programmation non-linéaire. Parmi les méthodes d'optimisation non-linéaires se trouvent d'une part la famille des méthodes déterministes comme l'optimisation non-linéaire et d'autre part celle des méthodes stochastiques comme l'algorithme génétique (Morales, 2013).

Par essence, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (*Life Cycle Assessment*) (*LCA*) est une méthode multicritère et se présente donc comme un moyen de choix dans l'évaluation de la durabilité d'un système.

2.3 L'analyse du cycle de vie

L'analyse de cycle de vie provient de la pensée cycle de vie (*Life cycle thinking*) (*LCT*) elle-même issue de l'Agenda 21 établi à Rio au début des années 90 (UNEP, 2009). Portée par l'initiative pour l'ACV de l'UNEP-SETAC (*society of Environmental Toxicology and Chemistry*), la pensée cycle de vie se répand et devient un principe clef pour l'évaluation de la durabilité et par conséquent pour sa mise en œuvre. En effet, dans le contexte de l'évaluation environnementale d'un territoire, la pensée cycle de vie est utilisée comme l'un des critères qui caractérisent la qualité d'une méthode ou d'un outil d'évaluation environnemental (Loiseau *et al.*, 2012). La notion de cycle de vie employée dans le domaine de l'ingénierie sera discutée dans la sous-section 3.1.1.4.

2.3.1 Définition

Le moyen d'analyse et d'évaluation le plus adéquat à l'analyse de la durabilité d'un produit (ou d'un procédé ou d'un service) développé depuis les années 90 est l'analyse du cycle de vie (ACV) (Tableau 2). Historiquement orientée vers les impacts environnementaux (les normes qui l'encadrent font d'ailleurs partie des normes de management environnemental) liés au cycle de vie d'un produit, l'ACV a été étendue aux impacts sociaux et économiques afin de rencontrer les objectifs de durabilité. L'expression « ACV » est utilisée à la fois pour caractériser un domaine d'étude, une méthode ou un cas spécifique d'étude.

L'ACV est une méthode systémique qui permet d'éviter les transferts d'impacts entre les différentes substances, entre les différents pays, entre les différentes catégories d'impacts sur

l'environnement, l'économie et la société, entre les différentes phases du cycle de vie. Elle observe un système d'un point de vue produit.

2.3.2 Structure générale de l'analyse de cycle de vie

L'ACV est une méthode d'aide à la décision qui s'appuie sur une méthodologie rigoureuse et transparente et qui se développe et s'améliore sans cesse (Jolliet *et al.*, 2005). Son intérêt réside dans la prise en compte des impacts sur l'environnement, l'économie et la société liés au cycle de vie d'un produit (ou d'un procédé ou d'un service), c'est-à-dire depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit, en passant par les phases de transport, de fabrication et d'utilisation. L'ACV est encadrée par les normes internationales de management environnemental ISO 14040 et ISO 14044. La première délimite le cadre général de la méthodologie et la seconde en décrit chacune des étapes en détail (ISO, 2006a, 2006b). Bien que ces normes se focalisent sur le volet environnemental, la structure qu'elle préconise peut être extrapolée et servir aux volets économique et social (UNEP, 2011). Ainsi à partir de ces normes, l'ACV se découpe en 4 étapes qui interagissent de façon itérative :

- (i) Définition des objectifs et du champ de l'étude. Cette étape primordiale qui oriente les suivantes consiste à définir le cadre à l'intérieur duquel toute l'analyse va être réalisée. À cet effet, il faut tout d'abord connaître les raisons de la réalisation de l'ACV et la portée des résultats. Ensuite, il convient de discuter du périmètre de l'étude selon deux aspects. D'une part, il faut sélectionner les limites fonctionnelles du système qui s'étendent généralement « de la porte à la porte », « du berceau à la porte » ou du « du berceau à la tombe » (*N.B.* Ces expressions sont à adapter en fonction du système étudié) (Jacquemin *et al.*, 2012). D'autre part, il faut choisir les limites « stratégiques » représentées par le caractère attributionnel ou conséquentiel de l'ACV. Le premier correspond à l'ACV dite classique, c'est-à-dire à une évaluation de l'ensemble des impacts d'un produit (ou d'un procédé ou d'un service) durant son cycle de vie (Earles et Halog, 2011). L'ACV conséquentielle s'appuie quant à elle sur l'ACV attributionnelle et étend le champ de l'étude aux conséquences d'un choix stratégique qui induit une variation de la demande d'un produit, laquelle mènerait à une augmentation ou à une diminution des impacts (Zamagni *et al.*, 2012). L'exemple le plus simple est illustré par la comparaison des ampoules fluocompactes et des ampoules à filaments. Les fluocompactes permettent de moins consommer en général, mais leur développement peut provoquer une baisse de la vigilance des utilisateurs qui peuvent alors laisser plus facilement les lumières allumées (Jolliet *et al.*, 2005). Une analyse approfondie de la littérature sur les ACV consé-

quentielles a montré qu'aucune différence méthodologique ne ressortait entre ACV attributionnelle et conséquentielle (Zamagni *et al.*, 2012). En effet, l'ACV conséquentielle ne consisterait qu'en une ACV attributionnelle dont les frontières du système seraient étendues. Par ailleurs, l'ACV repose sur la quantification du service rendu par le produit (ou le procédé ou le service) grâce à la définition de l'unité fonctionnelle qui correspond à une unité de service rendu. Elle permet de comparer les impacts de différents produits, services ou procédés, à service rendu égal. Finalement, le choix d'une règle d'allocation des flux doit être fait en fonction des critères d'importance mis en avant entre les différents flux, à savoir des critères économiques, environnementaux ou massiques. Les autres hypothèses de l'étude sont formulées lors de cette étape.

(ii) Inventaire du cycle de vie (ICV) (*Life cycle inventory*) (*LCI*). Cette longue étape a pour but de rassembler et de quantifier l'ensemble des flux de matière, d'énergie, de devises et de personnes associés à chaque processus élémentaire du cycle de vie. Il convient d'insister sur l'importance d'exprimer tous les flux en fonction de l'unité fonctionnelle. Par ailleurs, cette étape s'accompagne d'un diagramme de flux (ou modélisation de cycle de vie ou arbre des processus) lequel offre une vision dynamique et limitée de l'étude. En outre, la complétude et la qualité de l'inventaire implique une connaissance fine du système à analyser. Finalement, l'ICV sert de référence pour le calcul des impacts associés à chacun des flux inventoriés. Il s'agit d'une étape cruciale car l'omission ou l'imprécision de certaines données peut modifier grandement les conclusions de l'ACV. Pour limiter l'importance des données, une analyse critique de leur qualité doit être menée et servir de base à une analyse de l'incertitude et au calcul de la propagation des erreurs (ISO, 2006a). Une des principales difficultés de l'ACV réside dans la récolte des données et du choix des bases de données d'inventaire. L'enrichissement des bases constitue une voie majeure à emprunter pour pallier cette difficulté.

(iii) Évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) (*Life cycle impact assessment*) (*LCIA*). Sur la base de l'inventaire de cycle de vie et dans le respect des hypothèses faites lors de la définition des préliminaires de l'ACV, cette étape d'évaluation des impacts du cycle de vie classe puis caractérise les flux préalablement inventoriés dans des catégories d'impacts (ISO, 2006a). Ces dernières sont de nature différente selon les aspects environnementaux, économiques et sociaux. Elles sont explicitées dans les sections 2.3.3 à 2.3.5.

(iv)Interprétation des résultats. L'ultime étape de l'ACV établit un lien entre les trois premières étapes en ce sens qu'elle extrait, à partir des résultats d'ICV et d'AICV, les conclusions et recommandations générales en fonction des objectifs de départ. A ce stade, il est possible de revenir sur certains choix opérés lors des trois étapes susmentionnées. De ce fait, l'ACV apparaît comme une méthode itérative (ISO, 2006a).

À l'intérieur de ce cadre général d'analyse de cycle de vie, chacun des trois volets de la durabilité fait émerger trois types d'ACV dont les spécificités sont présentées ci-après.

2.3.3 Analyse environnementale du cycle de vie

L'analyse environnementale du cycle de vie (AeCV) se focalise sur les impacts environnementaux caractérisés par des indicateurs. Une distinction est faite entre les impacts intermédiaires (ou *mid-point*) et les dommages (ou impacts finals ou *endpoint*). Les premiers correspondent à des effets physico-chimiques et biologiques mesurables provoqués par des flux de matière et d'énergie (par exemple l'acidification, l'eutrophisation, le réchauffement global). Les seconds correspondent aux conséquences de l'augmentation des effets physico-chimiques et biologiques sur des éléments à protéger (par exemple la santé humaine, les ressources non renouvelables ou les écosystèmes) (Joliet *et al.*, 2010). Le choix des indicateurs environnementaux pour chaque catégorie est guidé par des « méthodes » d'évaluation des impacts. Selon la méthode, il est possible de calculer les impacts intermédiaires et/ou finals puis, éventuellement, de normaliser, pondérer et agréger les résultats. Le choix d'une méthode dépend des objectifs initiaux. Cependant, des experts en ACV ont récemment rédigé un article dans lequel les méthodes de caractérisation des impacts sont analysées et comparées. Ils aboutissent à des préconisations quant au choix des méthodes de caractérisation (Hauschild *et al.*, 2012). De cette étude réalisée pour le Centre commun de recherche (*Joint Research Centre (JRC)*) peut être construite une nouvelle méthode d'évaluation. Il convient de signaler que les valeurs des facteurs d'impacts intermédiaires en AeCV s'accompagnent en général d'une incertitude comprise entre 10 % et 30 %.

À travers cette étape et pour les aspects environnementaux, l'ACV se présente comme une AMC basée sur la méthode de la somme pondérée (Caillet, 2003). Elle propose plusieurs niveaux d'agrégation : un premier qui rassemble l'ensemble des substances chimiques en catégories d'impacts intermédiaires. À ce niveau, les facteurs de pondération sont les facteurs de caractérisation intermédiaire. Il reste alors une quinzaine d'indicateurs d'impacts intermédiaires qui peuvent ensuite être agrégés en des indicateurs de dommages (en général trois). Les facteurs de pondéra-

tion correspondants sont les facteurs dits de dommage (Figure 4). Dans le but d'obtenir un critère environnemental unique, certaines méthodes d'évaluation proposent de normaliser les indicateurs de dommages puis d'en faire la somme pondérée. Il convient de noter que la notion d'indicateur et de critère est relative au niveau d'agrégation étudié. En effet, si les critères sont les catégories intermédiaires, leurs indicateurs sont les flux. En revanche, si les critères sont les catégories de dommages, les catégories intermédiaires deviennent des indicateurs.

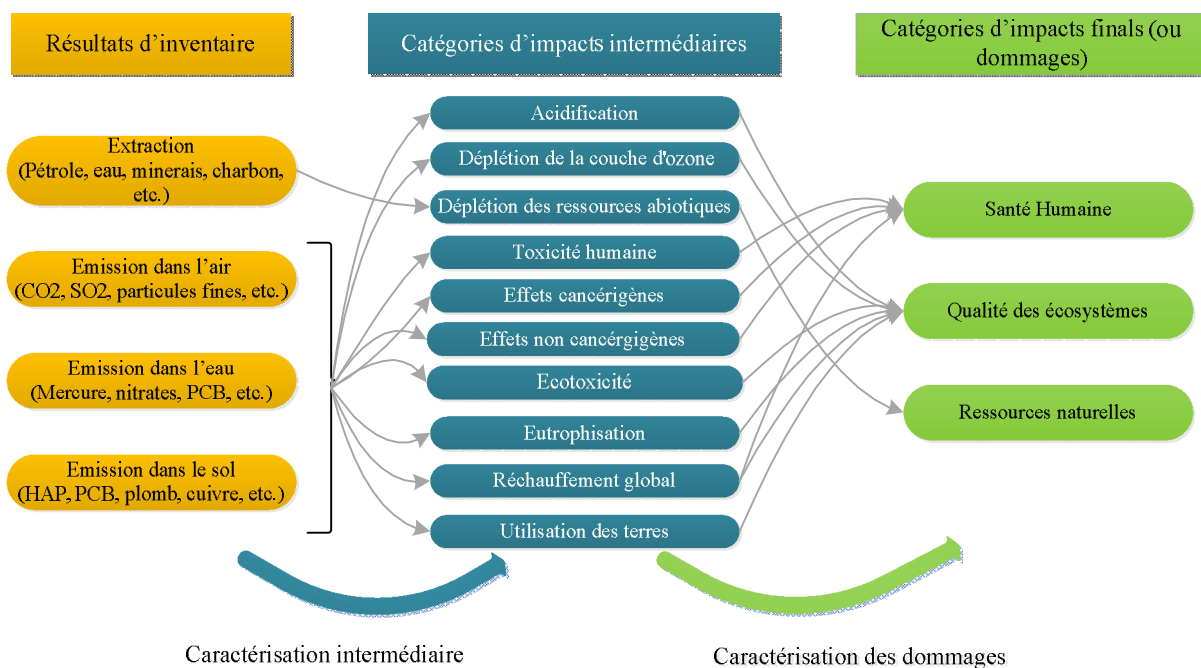


Figure 4. Principes du calcul d'impacts intermédiaires puis finals

Sur le plan des améliorations méthodologiques, la recherche scientifique joue un rôle dans le calcul de nouveaux facteurs d'émission et d'extraction au niveau de l'inventaire et dans le calcul des facteurs de caractérisation des impacts. En revanche, un consensus autour des catégories d'impacts à évaluer semble se dessiner à travers les différentes méthodes proposées. Ce consensus s'articule autour des catégories décrites dans la norme ISO14040. Il convient de noter que les catégories à évaluer les plus robustes correspondent aux effets globaux tels que le réchauffement climatique ou la déplétion de la couche d'ozone (Hauschild *et al.*, 2012). Les catégories qui font l'objet de nombreuses recherches actuelles concernent davantage les problématiques régionales ou locales telles que l'eutrophisation ou l'épuisement des ressources en eau.

L'analyse environnementale du cycle de vie (AeCV) ne couvre pas tous les aspects que requiert une décision pour la durabilité d'un système (UNEP, 2009). À cet effet, il faut compléter l'AeCV

par l'analyse du cycle des coûts (ACC) (*Life cycle costing*) (*LCC*) (volet économique de l'ACV) et par une analyse sociale du cycle de vie (AsCV) (*social Life cycle assessment*) (*sLCA*) (volet social de l'ACV).

2.3.4 Analyse des coûts du cycle de vie

L'analyse des coûts du cycle de vie (AcCV) (ou analyse du cycle des coûts) peut être vue comme le volet de l'ACV le plus ancien qui a été développé et standardisé aux États-Unis à partir de la Seconde Guerre mondiale. D'autres théories de l'AcCV ont été construites dans le domaine de l'ingénierie système (Swarr *et al.*, 2011).

L'Analyse des coûts de cycle de vie (AcCV) consiste à évaluer les coûts engendrés par un produit (ou un service ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie. Elle ne saurait être limitée ou être assimilée au prix de vente, ce dernier ne reflétant pas les coûts d'utilisation et de fin de vie (Swarr *et al.*, 2011). Les coûts évalués par l'AcCV sont idéalement internes et externes. Par interne, il faut entendre les coûts qui reviennent directement au producteur et ceux qui reviennent à l'utilisateur/consommateur. Par externes, il faut comprendre les coûts qui incombent aux autres parties prenantes telles que la société ou les concurrents. Ainsi, bien que le cadre méthodologique de l'AcCV soit le même que celui de l'ACV, le périmètre de l'étude s'élargit dans l'AcCV en incluant les coûts liés aux phases de recherche & développement ainsi que des coûts associés à des flux non physiques donc non comptabilisés en AcCV (Jolliet *et al.*, 2010). Les coûts du producteur incluent la valeur ajoutée laquelle couvre les salaires et les bénéfices. En ce qui concerne le consommateur, les coûts d'utilisation et de fin de vie sont inclus.

L'expression « analyse du cycle des coûts (ACC) » est largement employée pour désigner la même méthode. Sachant que l'ACV évalue les conséquences du cycle de vie d'un système sur l'environnement, l'économie et la société, l'expression « cycle des coûts » introduit une confusion en évaluant non plus le cycle de vie du système, mais le cycle de vie de coûts. L'analyse des coûts du cycle de vie se traduit en anglais par *life cycle costing* (*LCC*). L'Agence Française de Normalisation (Afnor) a édité une norme en 1997 qui définit le coût global comme « le coût d'acquisition et de possession d'un produit pendant une période déterminée de son cycle de vie » (Afnor, 1997). D'après la définition de l'AcCV, c'est le coût global étendu (CGE) qui lui correspond en ce qu'il comprend non seulement le coût global, mais aussi les externalités, les revenus et les coûts divers (MEEDDAT, 2009). La méthode du coût global fait appel à plusieurs indicateurs économiques tels que le coût actualisé, le temps de retour sur investissement, le taux de rentabilité interne, le

coût annualisé, etc. (MEEDDAT, 2009). En supposant qu'AcCV et CGE constituent la même méthode, les indicateurs (équivalents du volet économique des catégories d'impacts environnementaux) de coûts à confronter entre eux puis aux indicateurs environnementaux seraient donc ces indicateurs proposés dans le calcul du CGE. Ainsi, l'évaluation économique de l'entreprise peut être incluse dans le CGE donc dans l'AcCV en tant que méthode de calcul de certains indicateurs.

2.3.5 Analyse sociale du cycle de vie

Par définition, une analyse sociale (sociétale ou socioéconomique) du cycle de vie (AsCV) est « une technique d'évaluation des impacts sociaux et socio-économiques (réels et potentiels) positifs et négatifs tout au long du cycle de vie des produits » (UNEP, 2009). Si l'AeCV et l'AcCV portent sur des produits, procédés ou services, l'AsCV se concentre sur les comportements (Couture, 2013). Son intégration avec l'AeCV et l'AcCV apparaît comme un verrou à lever (UNEP, 2009).

Si l'AsCV requiert davantage de temps et de recherche pour être standardisée, la plupart des études sur l'AsCV s'appuie sur le guide de l'UNEP-SETAC (UNEP, 2009) qui fait office de référence et qui décrit les étapes de réalisation calquées sur celles de la norme ISO 14040. En analysant la littérature scientifique, peu d'articles ont été publiés sur l'AsCV. L'une des principales raisons réside dans la difficulté de sa mise en œuvre (Lehmann *et al.*, 2013). Néanmoins, l'intérêt pour ce domaine d'étude s'avère croissant avec notamment un nombre d'articles par an qui est passé de deux à dix-sept entre 2005 et 2013.

Au niveau de l'inventaire, les avis scientifiques divergent. Certains experts pensent en effet qu'une collecte des données aussi détaillée et précise que celle réalisée lors d'une AeCV n'est pas applicable à l'AsCV (Dreyer *et al.*, 2006; Jorgensen *et al.*, 2010). À l'opposé, d'autres argumentent que les données génériques tirées de bases de données statistiques mèneront à des estimations trop approximatives et trop grossières de certains impacts sociaux. Par conséquent, ils préconisent la récolte de données spécifiques au site d'étude comme pour l'AeCV et la convergence de la granularité des données environnementales et sociales (Foolmaun et Ramjeeawon, 2013; Weidema, 2006). Parallèlement, la constitution d'une base de données sociales globale a été initiée sous le nom de *social hotspots database* (Benoît-Norris et Norris, 2012). Ce projet peut être considéré comme l'équivalent social de la base de données environnementales Ecoinvent.

En ce qui concerne la caractérisation des impacts sociaux, plus de deux cents indicateurs existent. Le guide susmentionné les répartit dans trente-et-une sous-catégories. L'AsCV présente une sin-

gularité en ce qu'il est possible de classifier ces sous-catégories dans deux groupes : les catégories d'impacts ou les catégories de parties prenantes. Six catégories d'impacts sont définies : les droits de l'homme, les conditions de travail, la santé et la sécurité, l'héritage culturel, la gouvernance et les répercussions socio-économiques (UNEP, 2009). Les cinq catégories de parties prenantes définies par le guide sont : les travailleurs, les communautés locales, les consommateurs, les fournisseurs et partenaires, la société (UNEP, 2009). L'existence des deux groupes de catégories n'est pas contradictoire. Les catégories d'impacts sont davantage orientées vers le respect de principes tandis que les catégories de partie prenantes se focalisent sur des sujets à protéger.

En termes d'AMC et comme pour les catégories d'impacts environnementaux, les sous-catégories représentent tantôt les critères d'évaluation, tantôt les indicateurs.

2.3.6 Analyse de la durabilité du cycle de vie

L'analyse de la durabilité du cycle de vie (AdCV) (*Life cycle sustainability assessment*) (LCSA) intègre les résultats de l'AeCV, de l'AcCV et de l'AsCV pour proposer une vision globale d'un système dans le cadre de la durabilité. Il convient de noter que l'ancêtre de l'ACV, *Product line analysis*, datée de 1987 suggérait d'évaluer les impacts sur l'écologie, l'économie et sur la société donc sur la durabilité (Swarr *et al.*, 2011). Ainsi, après un détour par l'AeCV, le futur de l'ACV se trouve désormais du côté de l'AdCV avec des besoins de développer en parallèle les trois volets, leur intégration ainsi que leur couplage avec d'autres outils d'ingénierie (Guinée *et al.*, 2011).

D'un point de vue méthodologique, le cadre établi par la norme ISO 14040 et constitué des quatre étapes précédemment décrites semble convenir à l'application de l'AdCV. Les verrous scientifiques et techniques relatifs à cette AdCV résident dans la manière d'intégrer l'AeCV, AcCV et l'AsCV. Quelle que soit la solution proposée, il convient de rappeler que le recours à l'AMC s'impose en vue d'une prise de décision basée sur les résultats de l'AdCV (Finkbeiner *et al.*, 2010). Ainsi, plusieurs propositions d'intégration basées sur l'AMC ont été avancées.

La première proposition suggère de réaliser parallèlement l'ACV pour les trois piliers de la durabilité en utilisant les mêmes limites et la même unité fonctionnelle pour le système. L'AdCV revient alors à sommer les trois ACV : environnementale, des coûts et sociale. Cette somme peut ou non être pondérée selon les objectifs visés par l'étude et selon l'importance attribuée à chaque pilier (Finkbeiner *et al.*, 2010; Klöpffer, 2008; Traverso *et al.*, 2012; Vinyes *et al.*, 2013). Les inventaires et les évaluations d'impacts à réaliser se trouvent multipliées par trois. Le tableau 3 reprend le cadre méthodologique de cette première proposition.

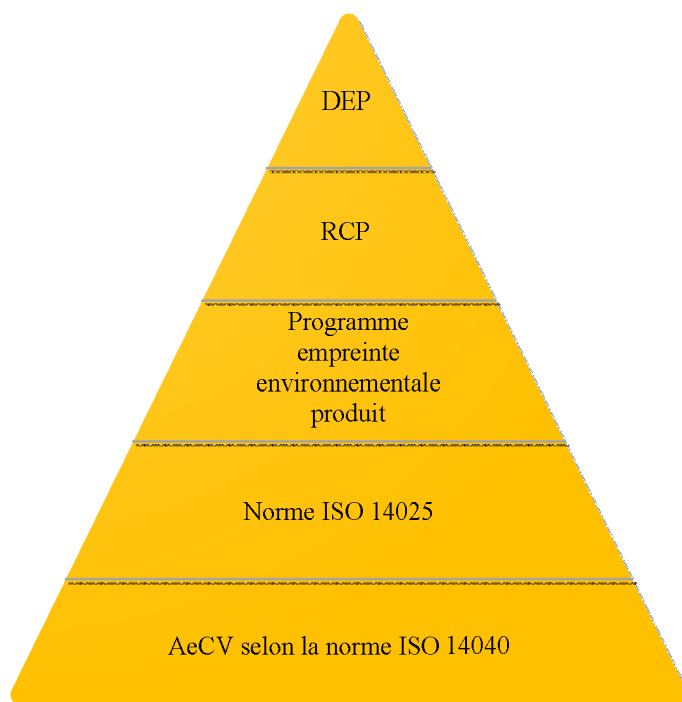
Tableau 3. Cadre méthodologique de l'AdCV (Swarr *et al.*, 2011).

Objectifs et champ de l'étude		
Même unité fonctionnelle et mêmes limites du système		
Inventaire environnemental du cycle de vie	Inventaire des coûts du cycle de vie	Inventaire social du cycle de vie
Évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie	Agrégation des coûts par catégorie de coûts	Évaluation des impacts sociaux du cycle de vie
Interprétation environnementale	Interprétation économique	Interprétation sociale

La seconde proposition d'AdCV fait table rase des trois ACV pour en développer une seule qui les intègre dès l'étape d'inventaire (Klöpffer, 2008). La troisième consiste à réaliser une AeCV et une AcCV couplée pour déterminer l'éco-efficience d'un système puis de réaliser l'AsCV (Cinelli *et al.*, 2013). Finalement, la dernière option récemment proposée par le *German Institute for Energy and Environmental Research* reviendrait à réaliser d'un côté une AeCV puis de l'autre une analyse socioéconomique du système (Cinelli *et al.*, 2013).

2.3.7 Exemple d'utilisation des résultats d'AeCV : l'affichage environnemental

La connaissance des caractéristiques environnementales d'un produit reposent sur l'application de la méthode d'analyse de cycle de vie encadrée par les normes ISO 14040 et ISO 14044. Afin que d'autres partenaires économiques ou le consommateur prennent conscience de l'effort réalisé par une entreprise pour connaître les impacts environnementaux de ses produits pour mieux les limiter, il s'avère indispensable de communiquer. À cet effet, plusieurs moyens existent parmi lesquels se trouve l'étiquetage. Néanmoins, pour que le destinataire de l'information véhiculée ne se perde pas dans la complexité et dans la particularité des résultats, des référentiels ont été élaborés. Ces derniers sont hiérarchisés comme le montre la figure 5.

**Légende**

DEP: déclaration environnementale de produit

RCP: règles de catégorie de produit

AeCV: analyse environnementale de cycle de vie

Figure 5. Hiérarchie des référentiels de communication environnementale

La norme ISO 14040 encadre la méthode d'AeCV. L'étiquetage environnemental est encadré par trois normes de la série des normes ISO 14020 :

- ✓ la norme ISO 14021 qui pose les principes de l'auto-déclaration sans revue critique (étiquette de type II) ;
- ✓ la norme ISO 14024 qui encadre la déclaration environnementale basée sur des résultats d'AeCV mais non revus (étiquette de type III) ;
- ✓ la norme ISO 14025 qui régit la déclaration environnementale basée sur les résultats d'AeCV revus et critiqués par un organisme indépendant (étiquettes dites de type I).

Un programme est en général lancé par une institution publique. L'exemple au niveau européen est l'empreinte environnementale produit (EEP) (*Product Environmental Footprint*) (PEF). En France, le programme d'étiquetage environnemental des produits mené par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie (ADEME) et l'Afnor constitue un exemple à une

échelle nationale. Ensuite, dans le cadre de ces programmes, chaque secteur développe un référentiel qui définit des règles de catégorie de produit (RCP) (*Product Category Rules*) (PCR) en s'appuyant sur les exigences des normes et programmes qui l'encadrent. À partir de ce référentiel, un produit particulier (ou un ensemble de produits très proches) va pouvoir bénéficier d'une déclaration environnementale de produit (DEP) (*Environmental product declaration*) (EPD) qui permet alors de communiquer sur les impacts environnementaux qu'il génère.

L'affichage environnemental vient s'ajouter à un ensemble d'informations déjà obligatoires sur les propriétés et sur la qualité des produits. L'enjeu d'un tel affichage est de fournir une information claire, suffisante et concise sans qu'elle soit trop vague ou trop incomplète.

2.3.8 Limites

L'analyse du cycle de vie est historiquement orientée « produit » bien qu'elle s'appuie sur la description du cycle de vie suivant une approche processus simplifiée. Le volet économique de l'analyse de cycle de vie inclus dans l'analyse du cycle des coûts oblige à une extension des limites du système tout en demeurant orienté « produit ». En revanche, l'analyse sociale de cycle de vie, en orientant son évaluation sur les parties prenantes, change le point de vue de l'analyse. En outre, l'analyse de cycle de vie d'un produit serait-elle une instance d'une méthode plus générique « d'analyse d'un cycle de vie d'un système de processus » ? Dès lors, l'analyse de cycle de vie constituerait une méthode applicable à n'importe quel système afin de qualifier et quantifier les processus, les paramètres, les contraintes, les flux de matière, d'énergie, d'information, de personnes. En ce sens, Loiseau *et al.* proposent d'appliquer l'ACV non plus à un produit mais à un territoire à condition de modifier le cadre de l'ACV (Loiseau *et al.*, 2013). Un tel exemple montre la force de la pensée cycle de vie.

2.4 Couplage des outils & méthodes

Les différents outils et méthodes pour la durabilité apportent des informations différentes sur un ou plusieurs systèmes et offrent plusieurs points de vue complémentaires. Aussi leur couplage semble-t-il pertinent dans le but de lier différents aspects d'un système. La démarche d'écoconception illustre la notion de couplage en s'appuyant sur la coordination, voire l'intégration d'outils de conception de produit, procédé ou service et de méthodes d'évaluation des impacts économiques et environnementaux. S'agissant d'une démarche d'ingénierie pour la durabilité des systèmes plus que d'un outil, elle est présentée et discutée dans le sous-chapitre 3.3.

Par ailleurs, l'exemple de l'écoconception d'un procédé basée sur une approche procédé-produit présente l'intérêt du couplage des outils de modélisation, simulation et optimisation des procédés avec des méthodes d'évaluation environnementale et économique.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière la quantité importante d'outils pour la durabilité. Dans une société consumériste centrée sur le produit, l'analyse de cycle de vie par son approche produit et sa vision complète sur le cycle de vie se place comme une méthode privilégiée d'évaluation pour la durabilité. Par ailleurs, la multiplicité et l'hétérogénéité des indicateurs de durabilité (dont les indicateurs issus de l'AdCV) amènent logiquement à recourir à l'analyse multicritère pour l'aide à la décision afin d'appréhender la complexité des enjeux liés à la durabilité. Cependant, les méthodes d'analyse et leur application font émerger certains verrous scientifiques.

V1. Si une méthode d'analyse de la durabilité du cycle de vie semble possible, comment résoudre le problème de l'intégration des volets environnemental, économique et social de l'ACV ?

V2. L'ACV est une méthode d'évaluation orientée produit. Est-il possible d'intégrer d'autres méthodes d'évaluation pour construire une méthode d'évaluation de la durabilité d'un système ?

V3. Comment l'analyse multicritère peut-elle aider à combiner les indicateurs hétérogènes issus des méthodes d'évaluations propres à chaque volet de la durabilité ?

Note : Dans la suite du manuscrit, l'ACV désignera la méthode générale en quatre étapes guidée par la pensée cycle de vie. S'il est question d'une ACV environnementale, des coûts, sociale ou de la durabilité, les expressions AeCV, AcCV, AsCV et AdCV seront respectivement utilisées.

Chapitre 3. L'ingénierie d'entreprise pour la durabilité des systèmes

Bécaert *et al.* pensent que l'ingénieur joue un rôle crucial dans la réduction des impacts sur l'environnement, la société et l'économie et endosse une responsabilité propre aux conséquences de ses actes (Bécaert *et al.*, 2010). Ils montrent notamment que les impacts environnementaux sont proportionnels à la taille de la population, au ratio du produit intérieur brut (PIB) par personne et à l'impact par unité de PIB. L'ingénieur ne pouvant pas agir sur la taille de la population, ni sur le choix individuel de consommation, il peut – et doit – cependant agir sur les impacts des activités économiques. En l'occurrence, il peut agir en concevant ou reconcevant des produits, procédés et services qui limitent les impacts négatifs sur la durabilité de la société. Par ailleurs, l'ingénieur reste au cœur de l'entreprise. Ce chapitre traitera de l'ingénierie à travers les liens qu'elle entretient avec l'entreprise, la conception et la durabilité.

L'ingénierie se définit comme une « opération de conception et de développement d'ouvrages mettant en œuvre plusieurs métiers (chacun avec son propre génie entendu comme un ensemble des connaissances et techniques d'un métier, concernant la conception, la mise en œuvre et les applications de procédés, de modèles et d'outils propres à ce métier) » (Ménadier, 2003). L'objectif principal de l'ingénierie est de répondre sous forme d'un projet en général à un besoin formulé par des parties prenantes. L'ingénierie apparaît étroitement liée aux notions de conception, de modèle, de simulation et d'optimisation. Par la complexité des systèmes sociotechniques actuels, une autre ingénierie que l'ingénierie qui utilise des modèles est-elle encore possible ?

Citant l'office de la langue française, Bécaert *et al.* définissent la conception comme suit : « activité créatrice qui consiste à élaborer un projet, une partie des éléments le constituant, en partant des besoins exprimés, des moyens existants et des possibilités technologiques dans le but de créer un produit ou un service. » (Bécaert *et al.*, 2010). Le processus de conception de produit ou de procédé est divisé en cinq étapes (ISO, 2002) :

- ✓ la planification et définition du produit ;
- ✓ la conception préliminaire ;
- ✓ la conception détaillée ;
- ✓ les essais et le prototypage ;

- ✓ la production.

« La démarche de conception implique l'optimisation de contraintes qui sont souvent compétitives » (Bécaert *et al.*, 2010). Les notions de simulation et d'optimisation apparaissent naturellement avec la notion de conception. Or l'optimisation repose sur des modèles. La conception repose donc sur des modèles.

La conception concerne un produit, un procédé ou un service. La différence entre ingénierie et conception semble tenue voire floue. La conception se trouve tantôt utilisée en tant que phases préliminaires d'un projet, tantôt comme un processus d'élaboration de projet. En outre, l'ingénierie semble être une opération de conception et de développement ce qui sous-entend que dans cette définition, la conception ne constitue qu'une phase du cycle de vie d'un ouvrage. Par la suite, la conception sera considérée comme une phase de l'ingénierie. L'ingénierie constitue toutes les activités qui rendent possible le cycle de vie d'un produit, procédé ou service.

3.1 Ingénierie des systèmes

3.1.1 Définitions préliminaires

3.1.1.1 Système

Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but (De Rosnay, 1977). Cette définition est reprise par Ménadier inspiré par la norme ISO 15288 : « combinaison d'éléments en interaction organisée pour atteindre un ou plusieurs objectifs définis » (Ménadier, 2003). Selon la norme ISO 9000, un système est défini comme un « ensemble d'éléments corrélés ou interactifs » (ISO, 2005). Cette acception couvre un champ plus large en omettant la notion d'objectif à atteindre. Ainsi, un astre peut être inclus dans cette définition tandis qu'il ne satisfait pas *a priori* à tous les éléments des deux précédentes définitions. La question philosophique autour du sempiternel débat entre finalisme et déterminisme peut être soulevée. À partir de quel niveau de complexité ou d'échelle spatio-temporelle le finalisme apparaît-il ? Dans la méthode d'analyse de cycle de vie, il est question d'un système de produit défini comme un « ensemble de processus élémentaires comportant des flux de produits et des flux élémentaires, remplissant une ou plusieurs fonctions définies, qui sert de modèle au cycle de vie d'un produit » (ISO, 2006a). Dans cette définition particulière, les éléments du système sont des processus et des flux de matière et d'énergie. Le système est donc restreint à des processus, eux-mêmes restreints à la transformation de flux de matière et d'énergie. Les flux d'information ne figurent pas dans cette

définition. L'Association Française de l'Ingénierie Système (AFIS) propose une représentation générique d'un système (Figure 6).

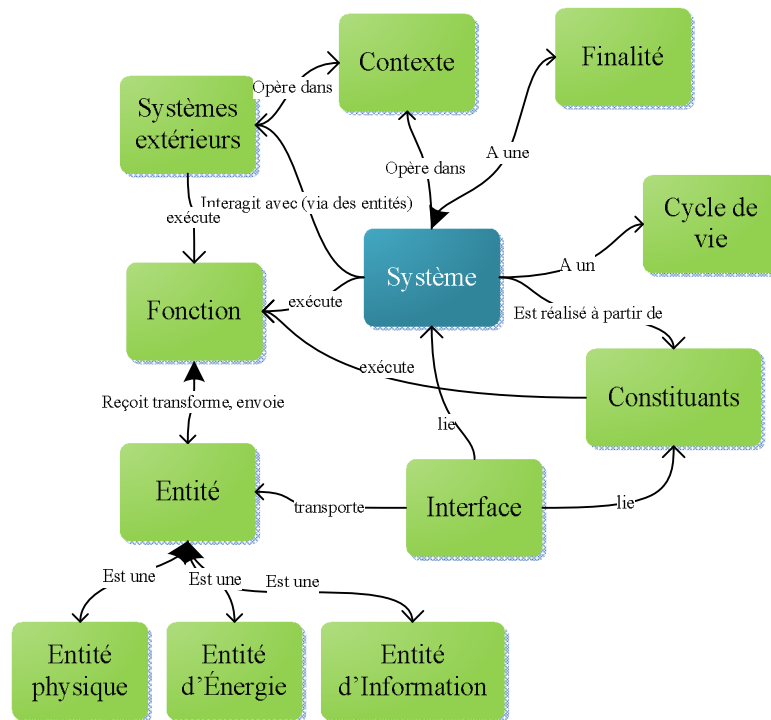


Figure 6. Caractérisation d'un système par ses relations avec des éléments internes et externes (AFIS, 2004)

Tout système est contenu dans trois sphères imbriquées les unes dans les autres (Plumecocq, 2013) : le système appartient à la technosphère (sphère des activités humaines) qui est contenue dans l'écosphère (sphère de la nature) elle-même contenue dans la sphère des valeurs morales (Figure 7).

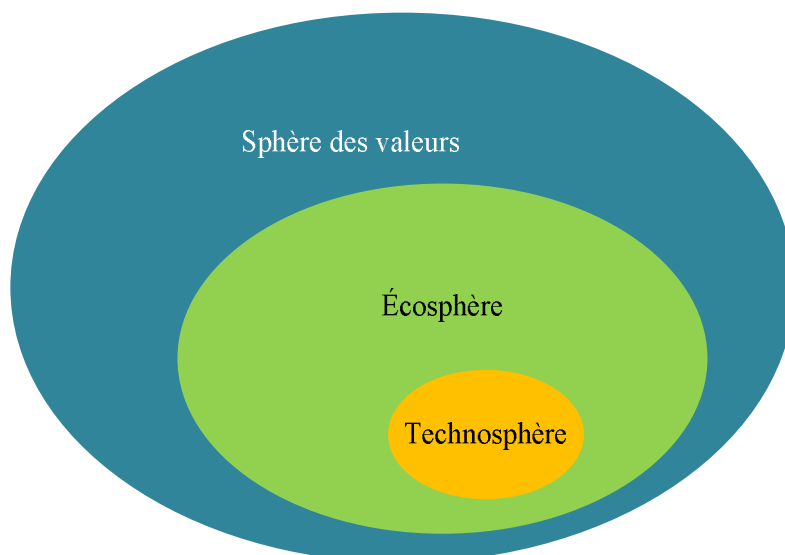


Figure 7. Sphères contenant les systèmes (Plumecocq, 2013)

Une telle représentation des ensembles dans lesquels tout système s'inscrit peut être rapprochée de la représentation classique du développement où la sphère du développement économique serait liée à la technosphère, la sphère du développement environnemental serait liée à l'écosphère et la sphère du développement social serait liée à la sphère des valeurs.

Les limites et par conséquent la définition même d'un système restent relatives aux objectifs et à l'échelle spatio-temporelle de l'étude. Un système pourra alors être analysé à plusieurs niveaux : système, environnement, sous-système (Brandenburg et Wojtyna, 2003). Les notions de système, sous-système et environnement sont toujours relatives en ce sens que le système étudié dans un contexte donné deviendra un sous-système d'un système plus large dans un autre contexte (Brandenburg et Wojtyna, 2003). En ingénierie système, une distinction est également faite entre le système à faire et le système pour faire (AFIS, 2009).

La systémie semble s'imposer comme la vision du monde la plus à même d'évaluer la durabilité des systèmes sociotechniques. La durabilité d'un sous-système est-elle une condition *sine qua non* à la durabilité du système global ? Probablement pas. Cela revient à affirmer que tout est relatif et par conséquent que tout dépend des priorités fixées : par exemple, une entreprise multinationale, qui décide de fermer une succursale dans un pays donné pour que la croissance des bénéfices dure, sacrifiera le sous-système représenté par la succursale au profit du système global. Si l'objectif avait été en revanche de faire durer au maximum l'entreprise avec le maximum de salariés, la succursale aurait continué à fonctionner malgré une diminution de la croissance des bénéfices.

3.1.1.2 Modèle

Afin de faciliter la conception et l'utilisation d'un système, l'ingénierie recourt nécessairement à la modélisation. La modélisation correspond à une « opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants » (CNRTL, 2013). Un modèle peut quant à lui être défini comme « un système plus ou moins homomorphe au système à étudier ou à construire, qui en donne une vue partielle plus ou moins abstraite et permet d'en étudier certaines caractéristiques » (Ménadier, 2003). Afin de compléter cette définition par une autre formulation, Truong-Meyer (2012) entend par modèle « une structure formalisée utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations ». De nombreux et différents formalismes ou langages existent selon les disciplines. Les modèles qui reposent sur un formalisme mathématique sont dits « virtuels », ceux qui reposent sur d'autres formalismes sont appelés « modèles vivants ». Parmi les langages de modélisation reconnus dans le domaine de l'ingénierie d'entreprise et des systèmes d'information se trouvent UML (*Unified Modeling Language*), SysML (*Modeling Language dedicated to complex Systems*) ou encore OCL (*Object Constraint Language*). Ils peuvent être plus ou moins graphiques ou textuels et reposent sur une grammaire qui dicte la structure et les relations entre les éléments de langage.

Par essence, modéliser revient donc à simplifier un système. Le modèle « complet » d'un système correspond en réalité à l'ensemble des modèles partiels qui sont chacun associés à un point de vue particulier sur le système (entreprise, produit, etc.). Tous les modèles partiels possèdent des éléments qui leur sont propres et des éléments mutualisés qui les lient les uns aux autres. Ainsi des modèles d'entreprise, des modèles de produits, des modèles de cycle de vie, des modèles d'environnement, des modèles d'impacts environnementaux, des modèles de société, des modèles de marché, etc. sont autant de modèles imbriqués à travers lesquels le système pourra être représenté.

3.1.1.3 Métamodèle

Modéliser revient à représenter un système réel par un modèle. Ce dernier est exprimé dans un formalisme défini par un métamodèle. Un modèle est qualifié d'instance d'un métamodèle. Il y est conforme si les éléments qui le composent correspondent chacun à une instance d'un élément du métamodèle. La métamodélisation qui consiste donc à définir des formalismes de modélisation peut elle-même être décrite par un modèle appelé métamétamodèle (Jézéquel *et al.*, 2012). Un

métamétamodèle permettra de rendre compréhensible un métamodèle. Depuis le système réel jusqu'au métamétamodèle, le niveau d'abstraction et de généralité augmente. La figure 8 représente les quatre niveaux de modélisation à partir du système réel.

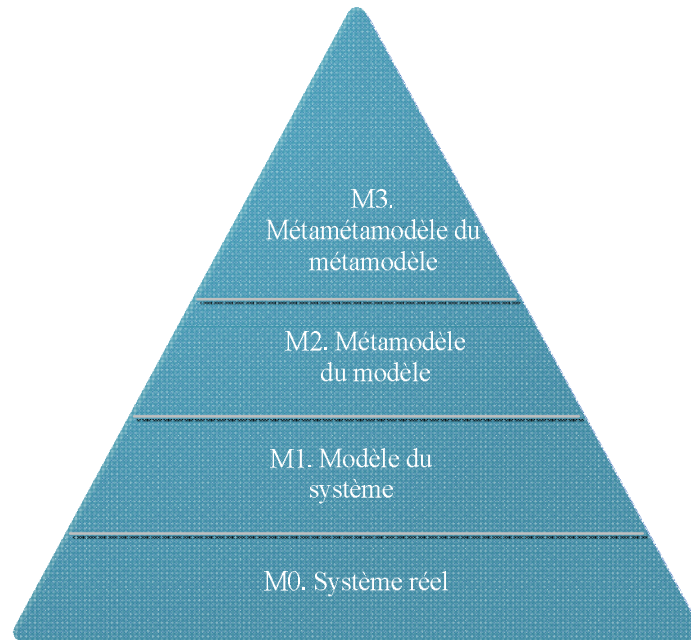


Figure 8. Niveaux de modélisation d'un système

Outre les langages de modélisation, un domaine de connaissance peut être décrit par une ontologie. D'après Gruber, une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation, cette dernière correspondant à une vision abstraite et simplifiée du monde (Gruber, 1995). Ainsi, une ontologie se trouve inextricablement liée à la modélisation. L'intérêt d'un métamodèle est discuté dans la sous-section 3.1.2.2.

3.1.1.4 Cycle de vie

La notion de cycle de vie (*Life Cycle*) demeure essentielle dans le domaine de l'ingénierie. Des objets génériques et de nature *a priori* différents ont un cycle de vie : l'ingénierie, le système, le produit, le service, le procédé, le projet d'ingénierie, le projet, le produit-service (AFIS, 2004; ISO, 2006a; Ménadier, 2003). Plusieurs définitions s'enrichissent mutuellement en apportant des nuances selon les objets dont il est question. Le cycle de vie d'un produit, service ou procédé traite des phases de réalisation et d'utilisation (ISO, 2006a). Comme le veut l'expression admise, il s'étend « du berceau à la tombe » (« *from cradle to grave* »). Le cycle de vie d'un système paraît plus générique que celui d'un produit ou service (vus comme des systèmes) en ce qu'il inclut

les phases préliminaires indispensables de recherche, de conception et d'essais (Ménadier, 2003). Ainsi, dans ce domaine, le cycle de vie comprend les phases de recherche exploratoire, conception, développement, production, utilisation, support, retrait. Dans sa thèse sur la gestion du cycle de vie des produits, Terzi (2005) définit un cycle de vie en 4 phases seulement mais qui comprend « l'enchaînement des phases depuis l'émergence d'un besoin jusqu'à son retrait ». Ainsi, le cycle de vie qu'il étudie revient en réalité à un cycle de vie complet incluant les phases préliminaires dans la phase dite de développement. Dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'information, le cycle de vie s'avère réduit, l'objet étant un modèle traitable par informatique. À cet effet, Ulmer (2011) propose la définition suivante : « Représentation des différents niveaux de dérivation d'un modèle. Il décrit le modèle depuis « l'énoncé des prescriptions pour arriver à un modèle traitable par informatique ». Une définition est donnée pour le cycle de vie d'ingénierie. Il correspond à « une succession de phases relatives à une instance d'un système et qui la font évoluer depuis un concept jusqu'à un ensemble de produits cohérents avec les critères de sortie de phase (c'est-à-dire de passage d'un stade au suivant) édictés pour le cycle de vie institutionnalisé dans l'entreprise » (AFIS, 2004). Plusieurs cycles de vie d'ingénierie peuvent être déroulés au cours du cycle de vie d'un système. Par exemple, l'introduction de nouvelles fonctions dans un système au stade « utilisation » nécessite de reprendre certaines activités d'ingénierie qui ont été conduites depuis la phase de conceptualisation. Enfin, le cycle de vie peut concerner un projet. Il convient de rappeler qu'un projet (processus projet) peut être divisé en phases elles-mêmes divisées en groupes de processus. Chaque processus peut ensuite être divisé en sous-processus parfois assimilés à des activités (Morley *et al.*, 2011). Le cycle de vie d'un projet correspond à « l'enchaînement des phases d'études, de production, d'intégration et d'essais qui jalonnent le déroulement du projet d'ingénierie système » (Ménadier, 2003).

Quel que soit l'objet, la notion de cycle de vie comprend un ensemble de phases successives de l'existence d'un objet, depuis l'idée jusqu'à la fin de vie. Quelle que soit sa définition et quel que soit l'objet auquel il se réfère, le cycle de vie est divisé en étapes, stades ou phases définies comme des « périodes du cycle de vie qui correspondent à un état du système ou de sa description » (AFIS, 2004). Le cycle de vie est donc une représentation temporelle du système.

La notion de recyclage d'un produit ou d'une de ses parties apparaît nécessairement avec la notion de cycle de vie et se présente comme un levier particulièrement pertinent pour la diminution des impacts environnementaux liés au cycle de vie du produit. Il est l'un des concepts phares de l'« économie circulaire » et de l'écologie industrielle.

3.1.1.5 Ingénierie système

L'ingénierie système (IS) (*system engineering*) (*SE*) est un domaine de recherche et un domaine appliqué qui correspond soit à la « phase de définition d'un système et des processus permettant de le produire, de l'exploiter, de le maintenir », soit à une « approche de collaboration interdisciplinaire pour le développement progressif et la vérification de la définition d'une solution (système et son cycle de vie) harmonieuse satisfaisant l'ensemble des parties prenantes et acceptable pour l'environnement » (Ménadier, 2003). En tant qu'approche, l'IS peut être *a priori* dans le cas où le système étudié n'existe pas. En revanche, elle est qualifiée d'approche *a posteriori* dans le cas où son application porte sur un système existant (même sous forme de modèle) (Mauborgne *et al.*, 2013). Si l'IS a surtout été appliquée à des domaines technologiques tels que l'aéronautique ou l'aérospatiale, elle pourrait s'ouvrir et être utilisée dans d'autres domaines tels que l'agro-industrie. Par essence, l'IS est une approche systémique et utilise des modèles. Deux domaines de recherche à ne pas confondre sont l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM) (*model driven engineering*) (*MDE*) et l'ingénierie système basée sur les modèles (ISBM) (*model based system engineering*) (*MBSE*). L'IDM est historiquement une méthode de développement de logiciel. Elle a été étendue à d'autres domaines sous le nom d'ingénierie système dirigée par les modèles. Elle correspond à une transformation de modèles au sein d'un même métier, c'est-à-dire d'un passage d'un modèle à un autre, d'un modèle à un texte ou d'un texte à un modèle (Jézéquel *et al.*, 2012). En revanche, l'ISBM correspond à une intégration de modèles issus de différents métiers. Cette intégration peut être réalisée à tous les niveaux de modélisation décrit dans la figure 8. Il n'y a pas obligatoirement de transformation de modèles.

3.1.2 Opérations sur les systèmes et leurs modèles

3.1.2.1 Simulation

Outre la représentation d'un système, un modèle permet d'en étudier le comportement et son évolution dans le temps grâce des méthodes de simulation. Par simulation, le CNRTL entend la « reproduction artificielle du fonctionnement d'un appareil, d'une machine, d'un système, d'un phénomène, à l'aide d'une maquette ou d'un programme informatique, à des fins d'étude, de démonstration ou d'explication » (CNRTL, 2013). Ainsi la simulation repose-t-elle sur des modèles et s'applique à tout type de système.

3.1.2.2 Intégration

Les systèmes réels ou les modèles qui les représentent selon un point de vue donné peuvent être intégrés selon différentes façons à des fins distinctes ou complémentaires. L'ingénierie définie comme une opération de conception et de développement d'ouvrages mettant en œuvre plusieurs métiers requiert par essence une ou des opérations d'intégration. Cette dernière présente nécessairement un caractère « systémique » en ce qu'elle permet de rassembler des connaissances analytiques. Ménadier (2003) définit la notion générale d'intégration comme la « fusion ou la combinaison de deux ou plusieurs éléments de bas niveau en un élément fonctionnel unifié de plus haut niveau, satisfaisant aux interfaces logiques et physiques ». Il décline ensuite le concept en fonction de trois expressions dans lesquelles il figure : l'intégration de système, l'intégration entre systèmes et l'intégration système. Le premier concept correspond au métier de réalisation d'un système, incluant notamment toutes les activités d'ingénierie système, d'intégration système ou encore de réalisation des constituants. Le second est défini comme « l'intégration entre deux systèmes non conçus initialement en vue de cette intégration. Dans le cas d'une intégration forte, le système de systèmes résultant apparaît comme un système homogène à ses utilisateurs » (Ménadier, 2003). Finalement, le concept associé à la troisième expression limite l'intégration à la phase de construction d'un système à partir de ses éléments (Ménadier, 2003).

La durabilité repose sur l'intégration des aspects environnementaux, économiques et sociaux des systèmes étudiés. Il s'agit ici de l'intégration au sens général. Dans une étude sur l'intégration des aspects économiques et sociaux dans le contexte de l'évaluation environnementale stratégique, Eggenberger et Partidário (2000) proposent cinq formes d'intégration : substantive, méthodologique, procédurale, institutionnelle et politique. Si l'analyse de cycle de vie se présente comme une méthode, l'intégration des trois piliers de la durabilité relèverait d'une intégration méthodologique. L'ingénierie peut être considérée comme la discipline transversale qui permet une intégration entre les cinq formes d'intégration. Ainsi se confirme sa place de choix dans la mise en œuvre de la durabilité.

L'ingénierie système propose des outils d'intégration entre les systèmes et/ou entre leurs modèles. Au cœur de l'intégration, le concept d'interopérabilité s'avère primordial. En effet, la fusion de deux modèles ou deux systèmes en un troisième nécessite que certaines propriétés soient compatibles et cohérentes. L'exemple de l'unification des réseaux ferrés entre la France et l'Espagne illustre simplement le problème d'interopérabilité. Pour fusionner, les systèmes ferroviaires français et espagnols doivent être de même dimension. L'écartement des rails étant différents,

l'intégration s'en voit quasiment impossible à moins d'une grande modification d'un des deux systèmes. L'interopérabilité n'avait pas été pensée au moment de la conception de chacun des systèmes. En ce qui concerne l'intégration des modèles d'un système, elle peut être atteinte grâce à la métamodélisation. La construction du métamodèle permet en effet d'imposer un formalisme auquel les différents modèles doivent se conformer pour être interopérables en cas d'intégration.

3.1.3 Approche orientée processus

L'entreprise en tant que système réalise un ensemble d'activités à des fins déterminées. Pour satisfaire les besoins des clients, la démarche qualité au sein de l'entreprise s'est peu à peu imposée à la fin du XX^{ème} siècle jusqu'à sa standardisation par la norme ISO 9000 publiée pour la première fois en 1987. D'après la norme ISO 9000, l'approche processus est au cœur d'une démarche qualité : « un résultat escompté est atteint de façon plus efficiente lorsque les ressources et activités afférentes sont gérées comme un processus en d'autres termes, toutes les activités doivent être regroupées en fonction des résultats qu'elles contribuent à produire » (ISO, 2005). Établissant un lien avec l'entreprise, Morley *et al.* (2011) caractérisent l'approche processus par la représentation d'une organisation ou d'un projet comme un système de processus. La méthode d'analyse de cycle de vie s'appuie également sur une approche processus en considérant le cycle de vie comme un système de processus. Aussi l'approche processus apparaît-elle intimement liée à la systémie.

3.1.3.1 Définition

Un processus est un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie (ISO, 2005). La figure 9 représente le modèle générique d'un processus. Cette représentation semble correspondre à un métamodèle de processus que respecteraient tous les processus traités quelle que soit l'échelle spatio-temporelle considérée (échelle des temps microscopiques/ thermodynamique, échelle d'un procédé, d'une chaîne de production, d'une entreprise, d'une collectivité etc...).

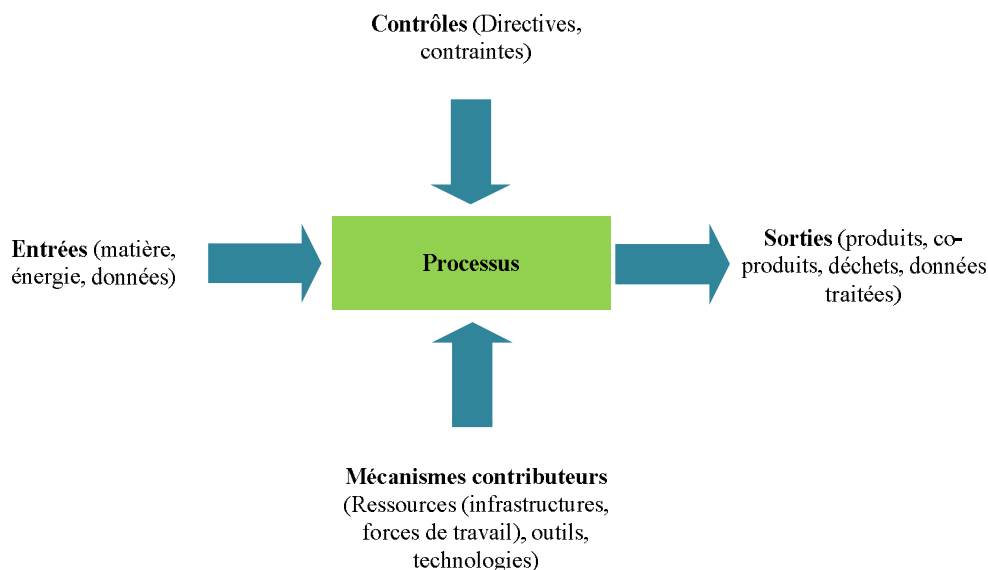


Figure 9. Représentation générale d'un processus (AFIS, 2004)

À la définition de la norme ISO 9000, plusieurs experts ajoutent certains aspects. Ainsi, Ménadier (2003) introduit la notion d'enchaînement logique et de progression des activités. Il décompose également une activité en opérations, tâches et actions. En outre, la séquence des activités est déclenchée par un événement pour atteindre un but fixé (Vernadat, 1999).

Le présent travail de thèse étant largement guidé par l'ACV, il paraît indispensable de rappeler qu'un produit est le résultat d'activité ou de processus (ISO, 2005; Ménadier, 2003). S'appuyant sur la norme ISO 9000, la norme ISO 14040 précise qu'il s'agit d'un bien ou d'un service. Elle identifie quatre catégories génériques de produits (produits matériels, logiciels, produits issus de processus à caractère continu et services). En outre, le produit revêt une importance particulière car il constitue un des quatre objets d'application (avec le projet, l'organisation ou la communauté) des moyens pour la durabilité (sous-chapitre 2.1).

3.1.3.2 Processus particuliers

Il existe une quantité incommensurable de processus particuliers. Cependant, certains sont plus génériques tels que le projet, le procédé et la procédure.

La norme ISO 9000 présente le processus particulier de projet. Il est défini comme un « processus unique de mise en œuvre de ressources mobilisées en vue du développement d'un système doté de fonctions. Il consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates

de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques, incluant les contraintes de délais, de coûts et de ressources » (ISO, 2005). Il convient d'insister sur le caractère unique d'un projet par opposition à un processus répétable. Par ailleurs, le projet correspond à l'un des quatre niveaux visés par l'application de moyens pour la durabilité.

Un procédé correspond à un moyen utilisé en vue d'obtenir un résultat déterminé (CNRTL, 2013). D'un point de vue plus spécifique, il peut également être vu comme une « suite d'opérations mises en œuvre pour le traitement ou l'élaboration de produits industriels » (CNRTL, 2013). Dans le domaine de la modélisation, le procédé est vu comme un modèle ou une définition d'un processus impliquant la fabrication de produits à partir de matières premières (Debauche et Mégard, 2004). Ces définitions mettent en évidence la différence et la relation qui existent entre le concept de processus et de procédé. Le processus est plus générique que le procédé.

Une procédure quant à elle est une manière spécifiée d'effectuer une activité ou un processus (Debauche et Mégard, 2004; Ménadier, 2003). Elle correspond à un modèle ou une définition d'un processus impliquant des personnes et de l'immatériel par opposition au procédé.

Dans la méthode d'ACV, le concept de processus élémentaire constitue un des éléments de base. Il s'agit de la plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie pour laquelle les données d'entrée et de sortie sont quantifiées.

Dans le domaine de l'ingénierie système, le processus de l'ingénierie d'un système constitue un ensemble logique et systématique de processus utilisés de façon sélective pour réaliser les tâches d'ingénierie d'un système (AFIS, 2004). L'AFIS introduit une nuance ici entre ingénierie système et ingénierie d'un système qui ne semble pas être relayée dans la traduction anglaise (*system engineering*). Ensuite, l'AFIS présente les quatre groupes de processus applicables à toutes les phases du cycle de vie d'un système, standardisés par la norme ISO 15288 : processus contractuels, processus d'entreprise, processus de management de projet et processus techniques (AFIS, 2004). Grâce à ces quatre catégories génériques, il est possible de situer l'ACV dans un contexte plus large d'ingénierie système et de faire émerger des liens avec l'ingénierie d'entreprise.

3.2 Ingénierie d'entreprise

3.2.1 Définitions

3.2.1.1 Entreprise

Ulmer (2011) propose une définition complète de l'entreprise : « l'entreprise est un système sociotechnique motivé par un ou plusieurs buts et objectifs. Elle possède une complexité apparente à la fois structurelle et organisationnelle. Ce système est ouvert car il possède des relations avec des entités extérieures et est dynamique, sa structure et son organisation n'étant pas figées dans le temps ». Dans des termes moins spécifiques, l'entreprise peut être résumée comme un « organisme de nature industrielle ou commerciale, fournissant des biens ou des services » (Académie Française, 2013). Aussi le terme « entreprise » renvoie-t-il au concept plus générique d'organisation (Ulmer, 2011). À la lumière de ces définitions, il apparaît que l'entreprise se trouve au cœur de la durabilité par ses liens avec les mondes économique, social et environnemental. Elle est d'ailleurs considérée comme l'un des quatre niveaux d'application des moyens pour la durabilité (sous-chapitre 2.1). Il paraît donc primordial d'évaluer l'entreprise à la lumière de ce concept, c'est-à-dire de déterminer ses conséquences économiques, sociales et environnementales. L'entreprise s'appuie sur un nombre important de savoir-faire regroupés au sein de métiers. Par sa nature systémique, elle peut être l'objet d'une modélisation. L'ingénierie d'entreprise (*enterprise engineering*) est la discipline à travers laquelle une entreprise va être conçue ou modifiée.

3.2.1.2 Ingénierie d'entreprise

L'ingénierie d'entreprise est une discipline qui s'attèle à établir, modifier ou réorganiser n'importe quelle entreprise (ISO, 1999). Elle s'est intéressée à la conception de systèmes de production, d'information et de décision (les trois principaux systèmes qui composent une entreprise) ainsi qu'à leur intégration. Tous les systèmes en question sont liés à des métiers au service de la stratégie globale de l'entreprise. Leur alignement s'avère alors nécessaire dans un environnement changeant de plus en plus rapidement et auquel l'entreprise doit s'adapter en se modifiant elle-même. L'ingénierie d'entreprise offre aux organisations des outils et des méthodes d'aide à la décision face à une complexité croissante. Elle « couvre les activités de conception, d'intégration et d'usage des systèmes, mais également la gestion de la cohérence, de l'interopérabilité et du cycle de vie des modèles, afin de répondre à un contexte dynamique et multi-projets, qui requiert des démarches de réutilisation et/ou de réingénierie » (Panetto *et al.*, 2008).

3.2.1.3 Ingénierie d'entreprise dirigée par les modèles

L'immanence de la modélisation et des modèles dans les activités d'ingénierie n'épargne pas l'ingénierie de l'entreprise, bien au contraire. La complexité d'une entreprise actuelle l'oblige à recourir à des modèles afin qu'elle maîtrise l'ensemble de ses activités et qu'elle les module en fonction des variations de l'environnement. En outre, l'informatisation du système d'information d'une entreprise place le modèle au cœur de l'entreprise et de la connaissance qu'elle peut avoir d'elle-même à tel point qu'elle s'en trouve pilotée par les modèles. C'est pourquoi l'ingénierie d'entreprise est dirigée par les modèles. Elle « met en relation des connaissances hétérogènes, explicitées par des modèles ou non (applications logicielles, procédures), représentant des domaines différents, réalisés par des acteurs aux compétences et pratiques de modélisation différentes » (Panetto *et al.*, 2008). Cette définition met en exergue l'extrême complexité de l'entreprise et de sa représentation, notamment par les innombrables modèles qu'elle peut engendrer. Par sa stratégie, l'entreprise peut orienter toutes les activités qu'elle regroupe et induire des variations notoires sur ses conséquences environnementales, sociales et économiques. Ainsi, agir sur la stratégie de l'entreprise peut se montrer d'une grande importance sur la durabilité. Cependant, pour que les décideurs élaborent une stratégie la plus durable possible, ils doivent être aidés, notamment par des outils d'aide à la décision qui intègrent les différents et divergents objectifs des différents acteurs de l'entreprise et plus largement des parties prenantes. Ainsi l'ingénierie d'entreprise dirigée par les modèles sera-t-elle au carrefour d'un grand nombre de disciplines.

3.2.2 Modélisation d'entreprise

La modélisation d'entreprise correspond à la construction d'un modèle de l'entreprise vue comme un système de systèmes. Elle ne doit pas être confondue avec la modélisation en entreprise qui signifie simplement l'utilisation de la modélisation dans les différents métiers de l'entreprise. Le but d'une telle démarche est de donner une explication sur la structure, l'organisation et le fonctionnement de l'entreprise. L'architecture d'une entreprise et plus généralement d'un système correspond à son « organisation fondamentale et son fonctionnement représenté d'une part par ses constituants, leurs interrelations, leurs relations avec l'environnement et d'autre part par les principes guidant sa conception et son évolution » (AFIS, 2004). Modéliser une entreprise revient donc à définir une architecture.

3.2.2.1 Méthodes de modélisation d'entreprise

Une méthode de modélisation fournit la description de l'organisation des processus d'un système soit dans le but de les simuler pour comparer divers scénarios, soit dans le but de les analyser et de les restructurer pour améliorer la performance système. Il existe deux types de méthodes de modélisation d'entreprise (MME): (i) des MME basées sur une architecture (ou cadre) de référence (ii) des MME appliquant des méthodes opérationnelles (par exemple la méthode SADT (*structured Analysis Design Technics*)) (Ulmer, 2011). Utilisant les méthodes de modélisation, Chokron et Des Rochers (2000) proposent une démarche générique de modélisation en 7 phases :

- ✓ choisir les firmes selon certains critères ;
- ✓ établir l'architecture de chaque firme ;
- ✓ déduire le modèle générique préliminaire ;
- ✓ faire valider le modèle par les experts ;
- ✓ établir le modèle générique final ;
- ✓ tester statistiquement les domaines ainsi obtenus.

Cette démarche de modélisation peut faire appel aux méthodes de modélisation lors de la phase de description de l'architecture de chaque firme.

3.2.2.2 Cadre de modélisation

Afin de guider la modélisation d'entreprise, il existe des cadres de référence qui consistent à proposer une approche (démarche pour représenter les objets de l'entreprise ainsi que leurs liens) pour développer une architecture. Ils permettent de conserver une cohérence entre les modèles de l'entreprise, assurant ainsi leur intégration (Le Duigou, 2010). Un cadre de modélisation est plus « générique » qu'une architecture (Ulmer, 2011).

Les cadres de modélisation d'entreprise sont multiples et présentent des avantages et inconvénients en fonction des objectifs visés. Ils sont présentés et comparés dans plusieurs travaux de thèse : Merise, Zachman, GRAI (Graphe à Résultats et Activités Inter-reliés), GIM (*GRAI Integrated Method*), ARIS (*Architecture for Integrated Information Systems*), CIMOSA (*Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture*), PERA (*Purdue Enterprise Reference Ar-*

chitecture), GERAM (*Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology*) (Le Duigou, 2010; Zaidat, 2005). Les plus complets, c'est-à-dire ceux qui proposent à la fois différents points de vue, différents niveaux de généricité et différentes phases du cycle de vie sont CIMOSA et GERAM (Le Duigou, 2010). Par ailleurs, comme GERAM s'appuie notamment sur CIMOSA, il peut être considéré comme le plus abouti et le plus général. En outre, GERAM sert de base à la norme ISO 15704 (ISO, 1999). La figure 10 reprend le cadre GERAM.

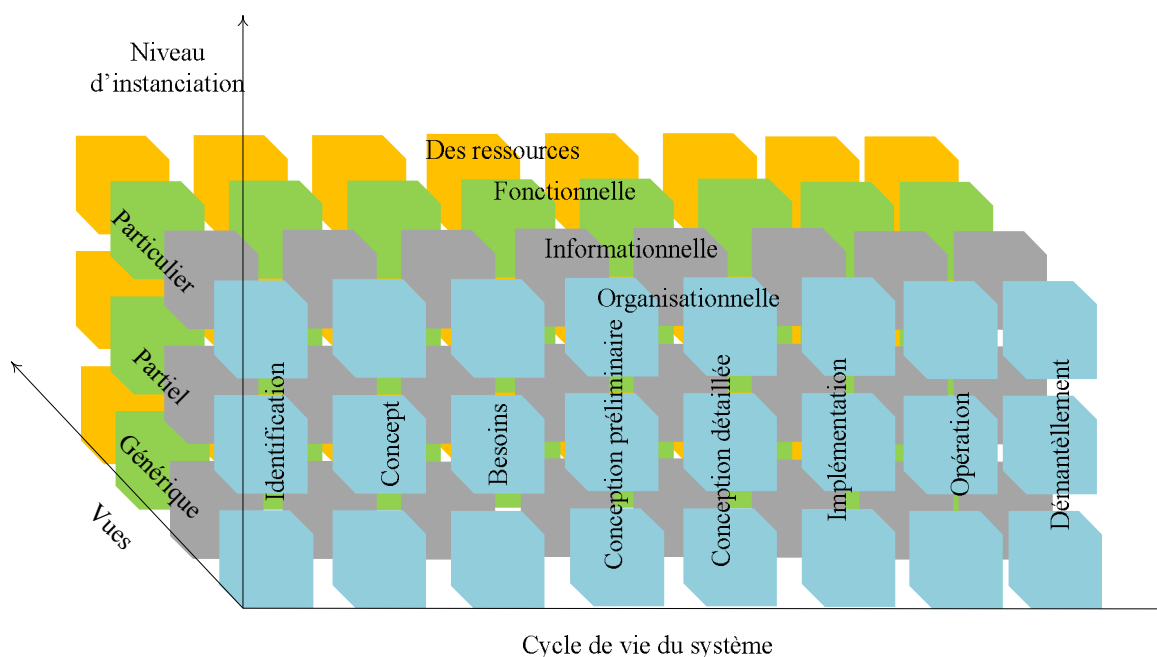


Figure 10. Cadre de modélisation GERAM

Il convient de préciser que les phases de conception préliminaire et de conception sont souvent comprises dans une seule phase dite de conception. En outre, il peut s'agir de conception ou de re-conception dans le cas d'une modification d'un système déjà existant.

3.2.2.3 Modèle d'entreprise

Quel que soit la méthode de modélisation, les éléments à décrire pour l'élaboration d'un modèle d'entreprise sont (Ulmer, 2011) :

- ✓ les objets (produit ou objet technique, information ou objet symbolique, etc.) ;

- ✓ les ressources qui sont soit des moyens inertes, soit des moyens financiers, soit des acteurs (un acteur est une ressource douée d'autonomie et pouvant communiquer. Il peut s'agir d'un agent humain, d'une machine autonome ou d'une application informatique) (Vernadat, 1999) ;
- ✓ les activités et processus (les processus d'entreprise sont très nombreux et sont traités dans la discipline *Business Process Management (BPM)* interprétée comme l'Ingénierie des Processus Métier (IPM) (Ulmer, 2011)) ;
- ✓ les différents aspects dynamiques, économiques humains et sociaux.

Il existe au moins quatre vues d'un modèle d'entreprise : la vue fonctionnelle (que faire et dans quel ordre), la vue informationnelle (quels objets sont utilisés), la vue organisationnelle (qui est responsable de quoi) et la vue des ressources (qui fait quoi et quand). Quelle que soit la vue choisie, un modèle est caractérisé par un niveau de généricité donné. Il peut donc être générique (c'est-à-dire qu'il constitue une brique de base utilisable à tout type d'entreprise), partiel (c'est-à-dire un modèle d'une entreprise réutilisable par d'autres entreprises du même type) ou particulier (c'est-à-dire un modèle d'une entreprise particulière). Finalement, chaque modèle d'une vue et d'une généricité donnée peut ensuite être dérivé tout au long des phases de cycle de vie de l'objet modélisé (Le Duigou, 2010).

À l'intérieur de ces cadres de référence, une entreprise peut être divisée en trois sous-systèmes (Le Moigne, 1994) :

- ✓ le système opérant qui transforme les flux primaires ou ressources (financiers, personnel, matière, information) ;
- ✓ le système de pilotage qui engage des processus de décision, définit les objectifs, les critères d'évaluation, les règles de gestion ;
- ✓ le système d'information qui relie les deux systèmes précédents : collecte, traite, stocke et diffuse l'information.

3.2.2.4 Entreprise & processus

Le processus se retrouve implicitement dans toutes les couches métiers d'une entreprise : l'entreprise peut être vue comme un ensemble de processus métier. Cette approche de l'entreprise par les processus peut être évidemment rapprochée de la démarche qualité encadrée par la norme ISO 9000. Elle permet la gestion des processus métier et garantit une agilité optimale face à un

environnement évoluant sans cesse (Ulmer, 2011). Au sein de la discipline IPM, les processus de l'entreprise peuvent être classés en quatre catégories (Debauche et Mégard, 2004) :

- ✓ les processus de pilotage (ou de management) qui consistent en un ensemble d'activités de pilotage dont les résultats sont des décisions stratégiques ;
- ✓ les processus opérationnels (ou de réalisation) dont les résultats sont un produit ou un service (ils peuvent être considérés comme les processus métier qui créent la valeur de l'entreprise) ;
- ✓ les processus de support (ou de soutien) dont les résultats sont des ressources utilisables pour les autres processus ;
- ✓ les processus de mesures (ou d'évaluation).

Ces quatre catégories de processus peuvent être impliquées à différents niveaux de l'entreprise : au niveau métier (processus de pilotage et opérationnels), au niveau fonctionnel (processus opérationnels et de support) et au niveau informatique (procédures et activités). Il convient de remarquer que les niveaux de l'entreprise font appel à des processus d'une même catégorie. Un processus fonctionnel peut être un processus opérationnel pour une entreprise ou de support pour une autre (Debauche et Mégard, 2004). Les processus opérationnels sont soit *frontoffice* (ils s'adaptent au cas particuliers générés par l'environnement externe) soit *backoffice* (procédures et procédés beaucoup mieux connues et maîtrisés). Une différence est faite entre les processus organisationnels (humains/collaboratifs orientés décision) et informatiques (techniques/transactionnels orientés traitement) (Debauche et Mégard, 2004).

3.3 Cas de l'écoconception

L'ingénierie trouve son essence dans la conception, qu'elle soit durable ou non. Il s'avère donc indispensable de décrire l'écoconception (*ecodesign*) en ce qu'elle représente une voie de l'ingénierie vers la durabilité. L'écoconception entretient un lien fort avec l'ingénierie et *a fortiori* avec l'entreprise. Pour être appliquée, l'écoconception doit être portée par la hiérarchie d'une entreprise. Ensuite, sa mise en place impose un dialogue entre les différents acteurs de l'entreprise, c'est-à-dire les différents experts métier, chacun possédant ses propres vues et utilisant ses propres modèles. L'intégration des compétences de chacun soulève la question de l'interopérabilité des différents modèles utilisés dans l'entreprise. Par ailleurs, les institutions pu-

blics, la recherche universitaires ou les entreprises privées doivent partager leurs compétences et collaborer pour qu'une conception durable soit réalisable (Ramani *et al.*, 2010).

3.3.1 Définition

Plus qu'un outil, l'écoconception se présente comme une démarche innovante dont l'objectif est de diminuer les impacts environnementaux d'un produit, service ou procédé tout au long de son cycle de vie (Schiesser, 2011). À cet effet, elle repose sur l'intégration de l'environnement dès la phase de conception ou de re-conception du produit, service ou procédé. Elle peut être perçue et intégrée soit comme une contrainte, soit comme un avantage concurrentiel (Bécaert *et al.*, 2010). L'écoconception est une approche « produit » tandis que les sites et systèmes sont approchés par l'ingénierie système (Perdreau et Thomas, 2012). Il convient d'étendre ici la notion de produit à celle d'un procédé ou d'un service. L'écoconception est une démarche préventive en tant que telle. La prise en compte systématique des considérations économiques et sociales mèneraient à une démarche intégrée de conception durable (Perdreau et Thomas, 2012).

3.3.2 Outils

Un nombre important d'outils d'écoconception sont disponibles. Chaque outil se caractérise par un niveau de préconisation mis en balance avec un niveau d'évaluation (Bellini et Janin, 2011). Les outils à haut niveau de préconisation tels que les guides, lignes directrices ou normes présentent en revanche un faible niveau d'évaluation. À l'inverse, l'ACV en tant qu'outil d'évaluation de plus haut niveau présente un très faible niveau de préconisation. Du point de vue de la recherche scientifique, l'ACV apparaît donc comme un outil d'écoconception voire de conception durable par la profonde connaissance qu'elle offre sur le système et ses conséquences sur la durabilité. En ce qui concerne les acteurs, la question se pose de savoir si l'ACV doit relever d'une compétence associée à un acteur particulier – l'expert ACV - ou si elle doit être intégrée par toutes les couches métiers au niveau des outils. À cette question, Puyou favorise la seconde option (Puyou, 2012). Dans cette vision, l'entreprise et le système en général conserve sa structure et ses différents métiers, mais chacun des métiers intègre des aspects de durabilité par un lien direct avec l'ACV. Aussi, dans le domaine de la conception de procédé, un certain nombre d'études ont vu le jour dans le but de coupler les outils de modélisation et de simulation de procédés chimiques avec les outils d'ACV (Gillani *et al.*, 2010; Jacquemin *et al.*, 2012).

3.3.3 Vers une approche d'intégration produit-procédé-entreprise

Le domaine du génie des procédés, en anglais *process systems engineering* (PSE), consiste principalement à modéliser, simuler et optimiser les procédés physicochimiques (Klatt et Marquardt, 2009). Pour la conception de procédés et dans un contexte de durabilité, les recherches sur la conception de procédés tentent depuis le début des années 2000 d'intégrer l'évaluation des impacts sur l'environnement puis, depuis les travaux d'Azapagic *et al.*, les aspects économiques et sociaux (Azapagic *et al.*, 2006). Gagnon *et al.* parlent même de génie des procédés durables (Gagnon *et al.*, 2012). Cette récente exigence du domaine peut être résumée par : « le génie des procédés suscite de grands espoirs quant au développement de procédés efficaces qui mènent à des processus de fabrication bénins pour l'environnement, économiquement attractifs et durables » (traduit de l'anglais) (Klatt et Marquardt, 2009). L'intégration des considérations environnementales, sociales et économiques dans le génie des procédés semble s'appuyer en grande partie sur la méthode d'ACV.

Il résulte du couplage entre le génie des procédés et l'ACV une approche dite produit-procédé qui se base sur l'interaction entre les cycles de vie du procédé et du produit. Cette interaction est proposée par Bauer *et al.* et reprise par Jacquemin *et al.* (Bauer et Maciel Filho, 2004; Jacquemin *et al.*, 2012). La figure 11 propose une synthèse de l'interaction des cycles de vie respectivement du produit et du procédé.

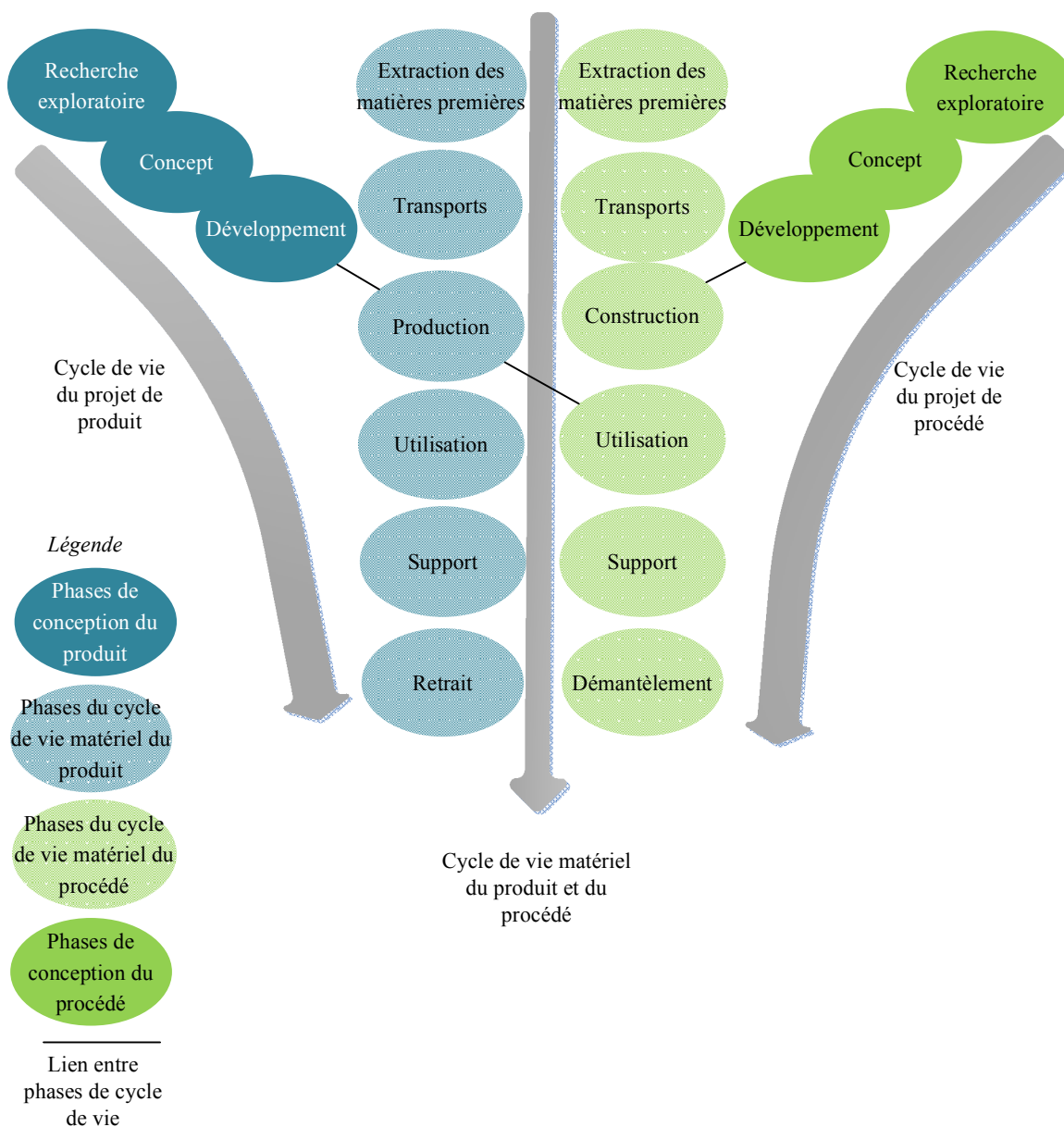


Figure 11. Interaction cycle de vie procédé et produit (Bauer et Maciel Filho, 2004)

Azapagic *et al.*, Bauer *et al.* Gasafi *et al.* ou Jacquemin utilisent un processus de conception de procédé « classique » en intercalant des phases de prise en compte de l'environnement (Azapagic *et al.*, 2006; Bauer et Maciel Filho, 2004; Gasafi *et al.*, 2003; Jacquemin, 2012). Finalement, il s'agit de l'utilisation d'un logiciel de conception de procédé et d'un logiciel d'ACV. L'idée est d'intégrer l'ACV dans la conception, c'est-à-dire d'inclure des contraintes supplémentaires dans le cycle de conception normal d'un procédé (Azapagic *et al.*, 2006).

Li *et al.* (2006) mettent en œuvre une méthodologie d'intégration d'objectifs environnementaux, techniques et économiques. À cet effet, il propose un couplage ACV/PSE en définissant des paramètres environnementaux et des paramètres technologiques liés au procédé. Ces paramètres dépendent de variables communes. La définition du système est importante et relative à l'échelle considérée.

Sugiyama *et al.* puis Peças *et al.* proposent une méthodologie d'évaluation du cycle de vie d'un point de vue ingénierie basée sur les volets économique (AcCV), environnemental (AeCV) et technique (Peças *et al.*, 2009; Sugiyama *et al.*, 2003). Ils évaluent les trois aspects d'un procédé séparément puis croisent les résultats dans un diagramme en triangle. Cette approche est valable pour la comparaison de deux alternatives.

Gillani *et al.* (2011) utilisent la modélisation des procédés pour améliorer et compléter le modèle du cycle de vie d'un produit dans le but d'améliorer la connaissance du produit et de ses impacts environnementaux. Les travaux de Gillani *et al.* ouvrent également le domaine du génie des procédés historiquement tourné vers l'industrie chimique au domaine de l'agro-industrie. Finalement, dans ses travaux de thèse, Gillani ouvre la voie vers une approche procédé-produit-entreprise afin d'intégrer le couplage entre le génie des procédés et l'ACV dans une démarche d'ingénierie d'entreprise plus globale (Gillani, 2013).

L'optimisation est surtout abordée par Morales *et al.*, Abiola *et al.* et Azapagic (Abiola *et al.*, 2010; Azapagic, 1999; Morales-Mendoza *et al.*, 2012) Les premiers proposent une équation d'optimisation multiobjectif afin de considérer à la fois le procédé et les contraintes environnementales. La seconde propose une optimisation de l'ACV via une méthode itérative et complète qui intègre des contraintes techniques et économiques. Il s'agit d'abord de concevoir le procédé à l'aide d'un logiciel dédié et d'utiliser les résultats qui en ressortent afin de les introduire dans une ACV. Enfin, les troisièmes définissent une démarche itérative d'ACV et de modélisation des procédés couplées à une optimisation multi-objective.

Une des principales questions soulevées concerne l'orientation de l'intégration des deux domaines : l'ACV est-elle au service du génie des procédés (PSE), ou l'inverse, ou sont-ils complémentaires ? L'analyse de la littérature montre que les trois cas sont envisagés selon les objectifs de la modélisation (Gillani *et al.*, 2010).

Finalement, l'approche produit-procédé trouve une voie complémentaire dans les travaux de (Heintz, 2012). Cette dernière propose en effet une approche systémique de substitution de consti-

tuants d'origine fossile par des constituants bio-sourcés aux propriétés physico-chimiques équivalentes pour la conception de procédés durables. Le couplage produit-procédé est intégré dans une démarche d'ingénierie d'entreprise et s'appuie sur la formalisation et la modélisation des contraintes liées au produit, ses propriétés exigées pour le procédé et pour l'environnement. Il est intégré dans un cadre plus global d'aide à la décision à base de groupes d'experts pour le choix du produit de substitution. Il faut souligner ici que l'approche proposée vise la conception de procédés durable bien qu'elle ne fasse pas appel à la pensée cycle de vie.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a montré que, par sa généralité (d'une certaine manière, tout est système), l'ingénierie des systèmes basée sur les modèles est sous-jacente aux autres domaines d'ingénierie, notamment l'ingénierie d'entreprise. L'entreprise se place comme un système sociotechnique complexe qui joue un rôle clef dans la durabilité. Son modèle complet est constitué d'un grand nombre de sous-modèles. Or pour que les décisions stratégiques du système de pilotage soient pertinentes, elles doivent s'appuyer sur une connaissance fine de tous les systèmes qui constituent l'entreprise. En outre, tous les modèles de ces systèmes doivent être reliés et cohérents entre eux pour être intégrés dans le modèle unique de l'entreprise. L'intégration des modèles passe par l'utilisation de concepts et méthodes transversaux et génériques issus de l'ingénierie système basée sur les modèles tels que les métamodèles. Finalement, l'approche procédé-produit pour la conception de produit ou de service a permis d'illustrer une première voie d'intégration de modèles. L'étude bibliographique sur l'ingénierie d'entreprise pour la durabilité des systèmes a fait émerger certains verrous scientifiques que l'approche proposera de lever.

V4. En présupposant que les outils de l'ingénierie d'entreprise et des systèmes puissent être appliqués à un système agro-industriel, comment peuvent-ils aider à le modéliser ?

V5. Comment la durabilité et son évaluation peuvent-elles être systématiquement intégrées dans les modèles d'une entreprise et orienter les décisions stratégiques ?

V6. Comment les différents modèles qui constituent le modèle d'une entreprise peuvent-ils être intégrés ?

Chapitre 4. La durabilité dans l'agro-industrie oléicole

Les trois précédents chapitres ont permis d'établir le contexte scientifique général dans lequel va s'inscrire la proposition de cette thèse. Elle sera appliquée au secteur oléicole en vue de sa validation. Le quatrième et dernier chapitre de cette partie dresse l'état de l'art de la durabilité dans l'agro-industrie oléicole.

4.1 Contexte

4.1.1 Économie & social

« Le génie des procédés alimentaires auxquels on peut associer les bioréactions, issu du génie chimique dans les années 60, est aujourd'hui devenu une branche active du génie des procédés. Il joue son rôle dans l'évolution rapide qui est celle des industries alimentaires actuelles » (Bimbinet, 1998).

Le secteur de l'huile d'olive appartient à l'agro-industrie. Il transforme l'olive en différents produits dont l'huile. L'olivier, symbole de longévité et de paix, s'épanouit dans un climat méditerranéen. C'est d'ailleurs autour de la méditerranée que sont actuellement cultivés 85% des oliviers dans le monde. Le reste de la culture oléicole se développe depuis peu en Argentine, en Australie et en Afrique du Sud principalement (Roig *et al.*, 2006). L'huile d'olive fait partie des symboles du régime crétois réputé comme l'un des régimes alimentaires les plus propices à la longévité en bonne santé. Il est en pleine croissance dans le monde entier grâce aux propriétés organoleptiques de l'huile vierge (OiLCA, 2011). Du point de vue de la production mondiale, bien que l'année 2013 présente une quantité produite en légère baisse par rapport à 2012, la tendance depuis 1990 est à la croissance grâce notamment aux campagnes de publicité vantant les bienfaits sur la santé de la consommation de cette huile. Ainsi, la consommation d'huile d'olive dans le monde est passée de 2 728 103 tonnes annuelles entre 2000 et 2007 à 2 926 103 tonnes entre 2008 et 2012 (COI, 2012a). Bien que la production de l'Union Européenne ait augmenté entre 2000 et 2007, sa part dans la production d'huile d'olive mondiale est passée de 78% entre 2000 et 2007 à plus de 73 % entre 2008 et 2012 à cause de la production croissante des pays extra-européens (COI, 2012b). L'agro-industrie oléicole représente plus 2,5 millions de producteurs dans l'Union Européenne dont un peu plus de 20 000 en France (Commission Européenne, 2002). Le secteur de l'huile d'olive représente un secteur stratégique de l'Union Européenne qui doit faire face à une compétition émergente due à l'arrivée de nouveaux producteurs d'autres continents.

Les problèmes économiques et sociaux auxquels peut être confrontée la filière sont principalement la concurrence avec d'autres huiles végétales et la concurrence entre les différents pays producteurs pour différentes raisons parmi lesquelles le coût de la main d'œuvre et le niveau de mécanisation.

4.1.2 Santé & alimentation

Le contenu de l'huile d'olive riche en acides gras insaturés, en polyphénols et en vitamine E lui confère des propriétés anti-oxydantes, antihypertensives, antiagrégantes plaquettaires particulièrement bénéfiques pour le système cardio-vasculaire (Ghedira, 2008).

Comme la plupart des produits alimentaires, l'huile d'olive et ses caractéristiques sont encadrées par des normes ou par une législation stricte. Le Conseil Oléicole International (COI) a édité une norme qui rappelle la dénomination des différents produits de consommation issus du secteur de l'huile d'olive. En effet, il existe plusieurs types d'huile d'olive en fonction des procédés d'extraction et surtout des propriétés physico-chimiques et gustatives de l'huile. Au total, la norme commerciale sur les huiles d'olive recense neuf types d'huile : six d'olive et trois de grignons d'olive (COI, 2011). Les grignons sont les résidus solides qui restent après l'extraction de l'huile d'olive vierge. Ils contiennent une faible quantité résiduelle d'huile d'olive (entre 2 % et 5 % en masse) qui est extraite à l'aide de solvant. L'huile qui en découle est une huile dite de grignons et non d'olive. Pour recevoir l'appellation « huile d'olive », une huile doit être extraite des olives uniquement par des procédés mécaniques. Les caractéristiques physico-chimiques de chaque type d'huile figurent en Annexe 1.

Outre les caractéristiques susmentionnées, d'autres plus qualitatives viennent compléter les critères de classification des différentes huiles. Il s'agit des attributs sensoriels des huiles qui ont été classés par le COI et la Communauté Économique Européenne (CEE) selon deux catégories : les attributs positifs et négatifs rassemblés dans le tableau 4.

Tableau 4. Classification des qualités et défauts sensoriels des huiles d'olives (Veillet, 2010)

<i>Défauts</i>	<i>Qualités</i>
Chômé/lies	Amer
Moisi/humide	Fruité
Vineux/vinaigré ou acide/aigre	Piquant
Métallique	
Rance	

Le secteur de l'huile d'olive, comme tout secteur économique, doit désormais s'assurer de sa durabilité. Afin d'atteindre cet état, il s'avère important d'évaluer les problèmes qui se posent tout au long du cycle de vie de l'huile d'olive.

En plus des conséquences sociétales de la production d'huile d'olive, l'industrie doit également et avant tout s'assurer de la qualité du produit vendu. Les propriétés physico-chimiques de l'huile d'olive nécessitent de prendre certaines précautions pour éviter toute contamination quelle qu'elle soit et ce, quelle que soit la phase du cycle de vie.

Ainsi, l'huile peut être contaminée par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Cependant, il s'agit d'une contamination accidentelle due à une exposition des olives aux gaz d'échappement des machines lors de la récolte ou à une extraction réalisée dans un environnement pollué (Rodriguez-Acuna *et al.*, 2008).

Une contamination aux phtalates a également été observée dans des échantillons de différentes huiles dont l'huile d'olive et l'huile de grignons d'olive (Nanni *et al.*, 2011). Les phtalates dérivent d'esters d'acides phtaliques essentiellement utilisés dans la plastification. Ils présentent une très grande affinité chimique avec les graisses et les alcools lourds (INRS, 2004). Concernant les effets sur la santé, des études ont montré leur action perturbatrice sur le système endocrinien (INRS, 2004). À ce titre, ils ont été intégrés à la directive REACH des substances à interdire. La migration des phtalates dans l'huile d'olive et l'huile de grignons d'olive trouve son origine dans le contact avec les parties plastiques des contenants en particulier les bouchons (Nanni *et al.*, 2011). Le passage par des tuyaux en plastique ou par des cuves en plastique lors de la production d'huile d'olive constitue la seconde source potentielle de contamination des huiles.

4.2 Description du système de production d'huile d'olive

Le cycle de vie du système de production d'huile d'olive se base sur un procédé ancestral divisé en sept phases principales : la culture des olives, l'extraction de l'huile, la mise en bouteille,

l'utilisation, la fin de vie des bouteilles, la gestion des résidus solides ainsi que la gestion des résidus aqueux (ou effluents aqueux également appelé margines) (EPD, 2010). Ce sous-chapitre présente toutes les phases du cycle de vie du système de production d'huile d'olive (Figure 12).

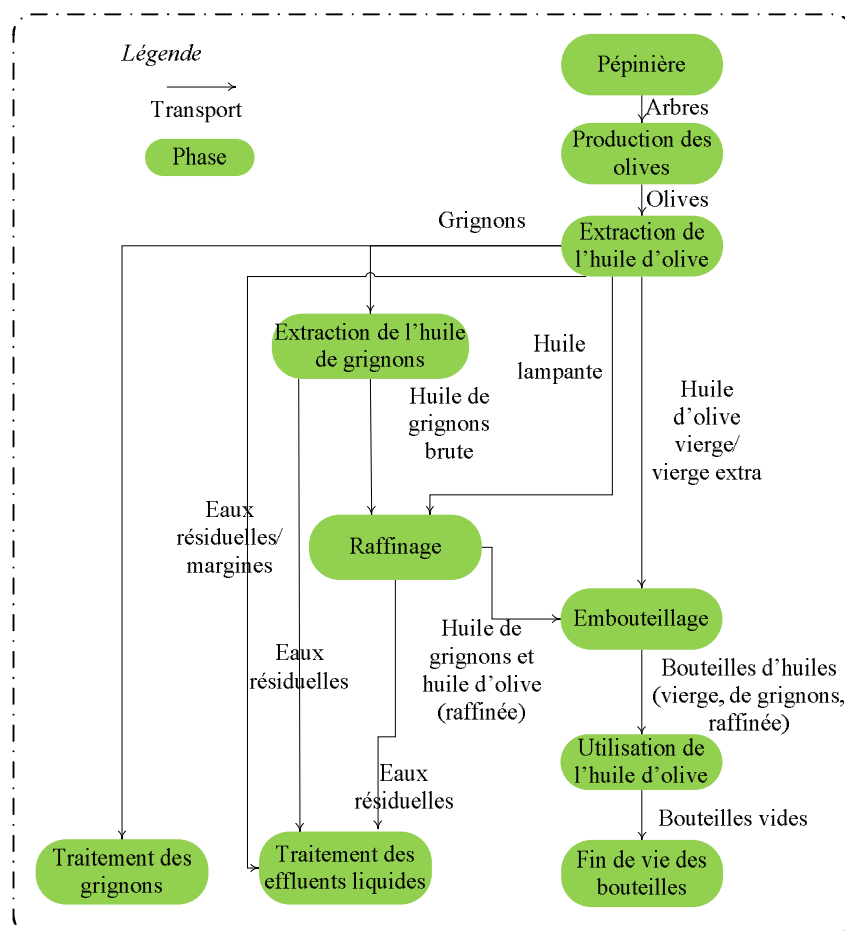


Figure 12. Cycle de vie de l'huile d'olive

4.2.1 Production des olives

Il existe un nombre important de pratiques culturales pour la production des olives. Les principales tendances sont la culture selon les principes de l'agriculture biologique ou selon les principes de l'agriculture conventionnelle, avec ou sans irrigation, manuelle ou mécanisée, marginale (dans les régions montagneuses), traditionnelle (entre 90 et 100 arbres par hectare), intensive (entre 300 et 650 arbres par hectare) ou superintensive (au-delà de 1000 arbres par hectare) (COI, 2012c). À partir de la littérature scientifique et technique, il est possible de dresser un portrait type de l'itinéraire cultural de l'olivier qui mène à la récolte des olives. Un nombre important de paramètres tels que les caractéristiques physico-chimiques des sols, le relief, l'ensoleillement ou la

variété de l'olive jouent un rôle significatif dans le rendement final en huile (Guzman et Alonso, 2008).

Avant la phase de culture des oliviers implantés de manière pérenne, il convient de mentionner la phase préliminaire de la pépinière. Elle consiste à cultiver des pousses d'olivier jusqu'à la plantation dans un verger de production. Cette phase requiert des processus d'irrigation, de fertilisation, de désherbage, de traitement phytosanitaire et d'entretien du sol. Après deux années en pépinière, les oliviers sont ensuite transportés au verger pour y être plantés.

La phase agricole à proprement parler peut alors commencer. A l'instar de la pépinière, elle met en œuvre un certain nombre de procédés agricoles qui visent à optimiser la production d'olives par les arbres. Les principaux processus retrouvés dans la littérature correspondent en grande partie aux sous-processus de la pépinière. Y figurent en effet l'irrigation, la fertilisation, le désherbage, le traitement phytosanitaire et l'entretien du sol auxquelles s'ajoutent la taille, la récolte et le transport des olives vers le moulin. Chaque processus a lieu une ou plusieurs fois dans l'année en fonction des conditions pédoclimatiques locales.

4.2.2 Extraction de l'huile d'olive vierge

L'extraction de l'huile d'olive a lieu dans un moulin. Pour obtenir l'huile d'olive, les olives sont réceptionnées au moulin avant d'être effeuillées puis lavées à l'eau. Elles sont ensuite broyées puis malaxées avant de passer par un procédé d'extraction de l'huile. L'huile qui en résulte est alors séparée de l'eau résiduelle puis stockée avant d'être mise en bouteille. Cette section propose un arrêt sur le procédé d'extraction et ses différentes options technologiques.

L'extraction consiste à séparer l'huile des autres composés de la pâte malaxée. Les procédés sont séparés en procédés continus et discontinus (El Hajjouji, 2007). Le procédé discontinu correspond au pressage. Les procédés continus correspondent à la centrifugation horizontale, soit à deux phases, soit à trois phases.

Le choix de la technologie d'extraction va induire la production de grignons bruts, de margines et d'eaux résiduelles aux propriétés physico-chimiques et biologiques différentes, lesquelles vont influencer le choix du traitement et, par conséquent, les impacts connexes. Les déchets les plus « simples » à traiter sont ceux issus du système 2-phases (et 2,5 phases) (Cinar et Alma, 2008). Les margines sont les résidus aqueux à forte teneur en matière organique issus de l'extraction par système 3-phases et demeurent très difficile à traiter. La qualité de l'huile d'olive semble égale-

ment différer en fonction de la technique d'extraction. Le système ancestral d'extraction par presse donnerait une qualité nutritive supérieure (Notarnicola *et al.*, 2004). Ainsi, le choix d'une technologie d'extraction doit être davantage orienté par les conséquences indirectes de son utilisation que par ces impacts directs. Le tableau 5 compare les avantages et les inconvénients de chaque système d'extraction.

Tableau 5. Comparaison des systèmes d'extraction de l'huile d'olive (Veillet, 2010)

Technologie	Avantages	Inconvénients
Presse	Nécessite peu d'eau à ajouter Bonne image vis-à-vis des clients (procédé traditionnel) Peu cher	Lent S'intègre difficilement à un procédé continu Possibilité relativement importante d'oxydation Nécessite une séparation huile/eau
Centrifugation 3 phases	Rapide Bon rendement Facile à nettoyer	Nécessite une grande quantité d'eau Procédé dispendieux
Centrifugation 2 phases	Huile d'olive directement séparée des grignons humides	Réglages précis à effectuer (quantité d'eau à ajouter au système pour ne pas colmater la centrifugeuse) Procédé dispendieux

4.2.3 Extraction de l'huile de grignons brute

L'extraction de l'huile de grignons brute est une pratique courante dans les plus grands pays producteurs tels que l'Espagne ou l'Italie. Les grignons d'olive bruts contiennent entre 2 % et 5 % d'huile résiduelle en fonction du type d'extraction à froid dont ils sont issus. Avant l'extraction de cette huile, les grignons sont séchés avant que les noyaux en soient séparés puis brûlés. L'énergie thermique dégagée sert à alimenter le procédé de séchage des grignons bruts entrants. Les grignons séchés (ou déshydratés) subissent alors une seconde centrifugation qui va permettre d'extraire une partie de l'huile résiduelle qui sera envoyée vers la raffinerie. Cette huile est appelée « huile de ressence » ou de « seconde centrifugation » (COI, 2012c). Les grignons dénoyautés sont macérés avant d'être mélangés à un solvant lipophile (l'hexane) en vue d'une extraction solide-liquide. Le mélange huile-solvant est alors séparé des grignons dits « épuisés ». Une désolvation suivie d'une distillation permettent ensuite de séparer l'huile du solvant. L'huile obtenue correspond à l'« huile de grignons brute » (Annexe 1), impropre à la consommation humaine. Comme l'huile de seconde centrifugation, l'huile de grignons d'olive brute est envoyée en raffinerie afin d'être transformée en huile comestible.

4.2.4 Raffinage

Le raffinage permet de traiter les huiles lampantes, de seconde centrifugation et de grignons brutes afin qu'elles puissent être coupées avec des huiles vierges et ainsi être consommées. Elle repose sur des procédés physico-chimiques qui vont permettre d'éliminer les défauts des huiles susmentionnées afin qu'elles puissent être utilisées pour la consommation humaine (COI, 2012c). Les procédés en question s'enchaînent selon la séquence suivante : dégommeage (qui consiste à traiter les huiles avec de l'eau ou de l'acide phosphorique chauds afin d'extraire les phospholipides et les gommes), décoloration (qui élimine la couleur des huiles à l'aide de terre ou de charbon actifs, lesquels sont ensuite séparés par filtration), « winterization » (qui consiste à porter les huiles à 5 °C pendant 24 heures), élimination des cires par centrifugation, désodorisation (par hydrodistillation à la vapeur), filtration.

4.2.5 Stockage & Mise en bouteilles

Le stockage des huiles a lieu dans des cuves ou dans des bouteilles. Les cuves de stockage contiennent généralement un gaz inerte (CO₂ et/ou N₂). Elles permettent un stockage plus long permettant d'étaler dans le temps la phase de mise en bouteille. L'huile est vendue soit « en vrac », soit en bouteille. La mise en bouteille consiste à transférer l'huile depuis les cuves vers des contenants de petit volume. Le procédé de mise en bouteille aussi appelé embouteillage est réalisé soit au moulin, soit dans une usine dédiée. Il comprend le coupage des huiles (mélange des huiles raffinées avec des huiles vierges), le remplissage, l'étiquetage et le conditionnement (mise en cartons). L'embouteillage peut être manuel ou automatisé selon la taille de l'installation.

4.2.6 Utilisation

L'huile d'olive est essentiellement utilisée à des fins culinaires, soit en assaisonnement, soit en friture. Elle peut également être utilisée dans des cosmétiques. Les consommations d'huile diffèrent selon les pays et leur culture. Après ouverture, elle se conserve à température ambiante.

4.2.7 Fin de vie

4.2.7.1 Des emballages & contenants

La fin de vie de l'huile d'olive n'existe pas en tant que telle dans la mesure où elle est consommée dans l'alimentation. En revanche, les emballages et contenants vides sont dirigés vers différentes

fins de vie selon le comportement du consommateur et selon les filières de traitement des déchets mises en place localement. Parmi ces filières se trouvent le réemploi, la réutilisation, le recyclage, l'enfouissement ou l'incinération. Ces techniques de traitement peuvent ou non donner lieu à une valorisation.

4.2.7.2 Des grignons, margines & eaux résiduelles

La fin de vie du cycle de vie de l'huile d'olive comprend également celle des grignons, des margines et des eaux résiduelles de procédés généralement mélangées aux margines. Ces trois flux sont considérés comme des déchets oléicoles lourds à traiter compte tenu de leurs quantités. En effet, l'huile ne représentant qu'en moyenne 20% de la masse d'une olive, les 80% restant (eau et matière sèche) constituent des déchets. Les principales pratiques actuelles utilisées pour le traitement des déchets oléicoles sont listées ci-dessous (Roig *et al.*, 2006) :

- ✓ épandage des grignons ou margines sur les terres agricoles ;
- ✓ compostage des grignons ou margines ;
- ✓ gazéification (méthanisation) des grignons ;
- ✓ combustion des grignons après séchage ;
- ✓ fermentation ;
- ✓ stockage des margines dans des étangs anaérobiques ou dans des étangs de décantation.

La meilleure option de traitement semble l'incinération des grignons grâce à l'énergie calorifique récupérée qui permet des émissions évitées. Le compostage accuse quant à lui le moins bon bilan environnemental à cause de l'impact de l'utilisation de tracteurs pour retourner régulièrement la matière organique (Salomone et Ioppolo, 2012).

4.2.8 Transports

Les transports constituent une phase transversale du cycle de vie dans la mesure où ils interviennent quasiment dans toutes les autres phases qu'il s'agisse d'acheminer les produits phytosanitaire au champ ou les bouteilles vides vers le moulin ou qu'il s'agisse de transporter les olives récoltées du verger au moulin. Les moyens de transports sont très variables et dépendent de la taille de l'ex-

exploitation. Il peut y avoir des tracteurs, des camions, des voitures, des 4X4 ou des utilitaires. La distribution vers le consommateur final fait partie des phases de transport.

4.3 Vers une analyse de la durabilité du cycle de vie de l'huile d'olive

L'agro-industrie oléicole a fait l'objet d'études sur la qualité, l'économie, les procédés d'extraction et sur le traitement des déchets des moulins. En revanche, aucune étude sociale ni aucune évaluation de la durabilité n'a été répertoriée en tant que telle. Les aspects de la durabilité du secteur oléicole sont abordés à travers une revue critique de l'ensemble des analyses du cycle de vie de l'huile d'olive. Au total, 18 études d'analyse du cycle de vie de l'huile d'olive et des olives à huile ont été retenues sur autant trouvées. Elles sont contenues dans 18 documents différents dont les dates de publication s'étendent de 2001 à 2012. Les auteurs ainsi que les cas d'étude analysés proviennent d'Italie, de Grèce, d'Espagne et de Chypre. La figure 13 montre la répartition des cas d'étude analysés.

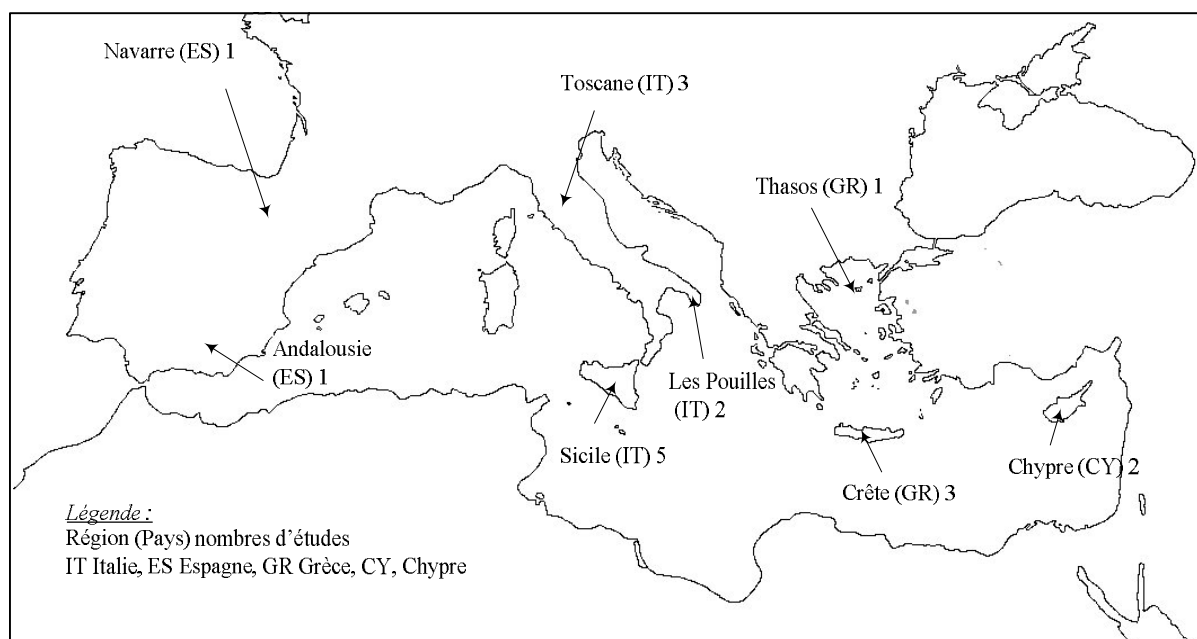


Figure 13. Répartition géographique des études d'ACV relatives à l'huile d'olive

4.3.1 Définition & champ de l'étude

Les analyses de cycle de vie relatives aux olives à huile et à l'huile d'olive sont attributionnelles. Aucune ACV conséquentielle n'a été menée à ce jour. Quatre auteurs ont mené à la fois une AeCV et une AcCV (De Gennaro *et al.*, 2012; Espi *et al.*, 2013; Neri, 2006; Notarnicola *et al.*, 2004; Recchia *et al.*, 2011).

Les objectifs des études retenues sont focalisés soit sur l'identification des points sensibles du cycle de vie pour une meilleure connaissance du système, soit sur une comparaison entre deux systèmes de production, soit sur la communication de l'empreinte environnementale auprès des consommateurs, soit une association de ces trois objectifs. Les deux études destinées à la communication auprès des consommateurs ont été soumises à une revue critique par un organisme indépendant (EPD, 2012a, 2012b; Espi *et al.*, 2013). Les articles publiés dans les revues avec comité de relecture bénéficient également d'une revue critique par des experts indépendants. Le tableau 6 rassemble les principales caractéristiques des études d'ACV retenues.

Tableau 6. Caractéristiques générales des études d'ACV relatives à l'huile d'olive

Auteurs	Document ¹	Lieu du cas d'étude	Unité fonctionnelle ²	Frontières du système	Allocation	Priorité environnementale
(Nicoletti <i>et al.</i> , 2001)	Article (R)	Italie (non spécifié)	1 kg HdO	Du berceau au moulin	économique et massique	Comparaison
(Notarnicola <i>et al.</i> , 2004)	Article (R)	Bari (Italie)	1 kg HdOV	Du berceau au moulin	économique	Comparaison
(Georgiou <i>et al.</i> , 2006)	Rapport (R)	Voukolies (Crête, Grèce)	5,4L HdO	Du berceau au moulin	économique	Identification des points sensibles + évaluation d'une région
(Cortes, 2006)	Rapport (R)	Ribera Baja (Navarra, Espagne)	5,4L HdO	Du berceau au moulin	économique	Identification des points sensibles + évaluation d'une région
(Avraamides et Fatta, 2006)	Rapport (R)	Lythrodontas (Chypre)	5,4L HdO	Du berceau au moulin	économique	Identification des points sensibles + évaluation d'une région
(Olivieri <i>et al.</i> , 2005)	Poster	Toscane (Italie)	1 kg O	Du berceau au champ	-	Comparaison
(Olivieri <i>et al.</i> , 2007)	Article de conférence	Toscane (Italie)	0,75 L HdOVE	Mill-to-mill	non	Identification des points sensibles
(Avraamides et Fatta, 2008)(ECOIL)	Article (R)	Lythrodontas (Chypre)	1 L HdOVE	Du berceau au moulin	non	Comparaison
(De Gennaro <i>et al.</i> , 2012)	Article (R)	Apulia (Italie)	1 t O	Du berceau au champ	non	Comparaison
(Salomone et Ioppolo, 2012)	Article (R)	Messina (Italie)	1 t O	Du berceau au moulin	non	Comparaison
(Guzman et Alonso, 2008)	Article (R)	Andalousie (Espagne)	1 ha or 1 L HdO	Du berceau au champ	non	Comparaison
(Kaltsas <i>et al.</i> , 2007)	Article (R)	Thasos (Grèce)	1 ha	Du berceau au champ	non	Comparaison
(Recchia <i>et al.</i> , 2011)	Chapitre de livre (R)	Toscane (Italie)	1 kg HdO	Du berceau au moulin	économique	Évaluation d'une région
(Michalopoulos <i>et al.</i> , 2011)(EPD, 2012a)	2 Rapports (R)	(Nileas), Heraklion (Peza) Lasithi (Mirabello) en Crête (GR)	0.75 L HdOV	Du berceau à la tombe	non	Communication + évaluation d'une région
(Dessane, 2003)	Thèse de Master (R)	Messara Valley, (Crête, Grèce)	1 kJ or kcal O, 1 t O, 1 ha	Du berceau au champ	économique et massique	Comparaison
(EPD, 2012b)	Rapport (R)	Sicile (Italie)	1 L HdOVE	Du berceau à la tombe	économique et massique	Communication
(Fiore <i>et al.</i> , 2009)	Article (R)	Sicile (Italie)	0,5L HdOVE	Du berceau au moulin	oui	Identification des points sensibles
(Neri, 2006)	Rapport technique	Bari (Italie)	0.75 L HdO	Du berceau à la tombe	?	Identification des points sensibles + Comparaison

¹(R) = revue critique par un expert indépendant

²O = olive, HdO = Huile d'olive, HdOV = Huile d'olive vierge, HdOVE = Huile d'olive vierge extra, HGdO = Huile de grignons d'olive, HdOR = Huile d'olive raffinée

4.3.1.1 Unité fonctionnelle

Selon les objectifs, l'unité fonctionnelle peut différer d'une étude à l'autre. Parmi les études sélectionnées, les unités fonctionnelles correspondent à une quantité d'olives (1 tonne ou 1 kg) (De Gennaro *et al.*, 2012; Dessane, 2003; Olivieri *et al.*, 2005; Salomone et Ioppolo, 2012) ou à une surface (1 ha) (Guzman et Alonso, 2008; Kaltsas *et al.*, 2007) dans le cas des études focalisées sur la production des olives. Les études sur l'huile d'olive se basent sur une unité fonctionnelle correspondant à une quantité d'huile d'olive (1 kg) (Nicoletti *et al.*, 2001; Notarnicola *et al.*, 2004; Recchia *et al.*, 2011), à un volume d'huile d'olive (0,75 L, 1 L ou 5,4 L) (Avraamides et Fatta, 2006 ; Avraamides et Fatta, 2008 ; Cortes, 2006 ; EPD, 2012a ; 2013 ; Fiore *et al.*, 2009 ; Georgiou *et al.*, 2006 ; Michalopoulos *et al.*, 2011 ; Neri, 2006 ; Olivieri *et al.*, 2007) ou au contenu énergétique de l'huile (1 kJ ou 1 kcal) (Dessane, 2003).

Si l'information est fournie, les huiles d'olive étudiées sont vierges, vierges extra, raffinées, de grignons d'olives. Les unités fonctionnelles basées sur une quantité d'olives ne précisent pas explicitement la variété d'olives. Le principal intérêt à choisir une unité fonctionnelle orientée vers une quantité d'olives plutôt qu'une quantité d'huile repose sur la grande variabilité organoleptique des différentes huiles d'olive qui peuvent être extraites tout au long du cycle de vie du système (Salomone et Ioppolo, 2012). Il convient de noter que ni la qualité de l'huile, ni celle des déchets n'intervient dans les évaluations environnementales analysées.

4.3.1.2 Allocation

Les analyses de cycle de vie reposent fondamentalement sur un jeu d'hypothèses qui doivent être explicitées. Ces dernières confèrent généralement un caractère unique à l'étude qu'elles justifient. Parmi ces hypothèses essentielles figure le choix de l'allocation des flux entre les différents co-produits tels que l'huile d'olive vierge, les noyaux, les grignons bruts, les eaux résiduelles et les résidus de taille. Toutes les études qui procèdent à une allocation le font entre l'huile d'olive et les noyaux ou les grignons. Quelques études ne recourent pas à l'allocation par un choix d'unité fonctionnelle adéquat (sous-section 4.3.1.1) (Salomone et Ioppolo, 2012). En revanche, aucune allocation n'est utilisée entre les différentes huiles, à savoir les huiles vierges (incluant les huiles vierges extra), les huiles de grignons d'olive et les huiles d'olive (raffinées) Le choix détaillé des types d'allocation retenus figurent dans le tableau 6.

4.3.1.3 Frontières du système

Selon le choix de l'unité fonctionnelle, les frontières du système varient du berceau à la tombe, du berceau à la porte ou de la porte à la porte (Jacquemin *et al.*, 2012). Afin d'adapter ces expressions aux études d'ACV des olives à huile et de l'huile d'olive, les frontières du système seront du berceau à la tombe, du moulin au moulin pour les études focalisées sur la phase d'extraction de l'huile, du berceau au moulin pour les études focalisées sur les phases agricole et d'extraction de l'huile, du berceau au champ pour les études focalisées sur la phase agricole. La phase d'utilisation se trouve systématiquement exclue des études pour des raisons de trop grande diversité d'usages. Cependant, si une étude intégrait des aspects sociaux, les bénéfices pour la santé du consommateur pourraient mener à reconsidérer l'exclusion de la phase d'utilisation.

4.3.1.4 Scénarios

Avec les 18 ACV retenues, plusieurs scénarios ont été comparés sur la base des différents aspects présentés dans le sous-chapitre 4.2, à savoir les pratiques culturales, les procédés d'extraction, les types de bouteilles ou encore les options de gestion des déchets.

4.3.2 Inventaire du cycle de vie

4.3.2.1 Source des données

La phase de collecte des données d'inventaire du cycle de vie se divise en deux parties selon que les données sont directes ou indirectes. Les premières proviennent d'association de professionnels ou de personnes du domaine tandis que les secondes sont tirées de la littérature. Les données directes comprennent les intrants énergie et matière et les informations qualitatives quant aux pratiques des professionnels. Elles n'incluent pas les émissions calculées. Elles sont obtenues au moyen de questionnaires, d'entrevues, de mesures et à partir de la littérature. Les données indirectes sont extraites de bases de données d'inventaire de cycle de vie telles qu'Ecoinvent ou Buwal 250, de la littérature scientifique ou de rapports techniques. Certaines données indirectes proviennent de calculs basées sur des méthodes disponibles dans des guides ou de la littérature scientifique.

4.3.2.2 Qualité des données, incertitudes et simulation de Monte Carlo

Bien que l'analyse de la qualité et de l'incertitude des données ait été considérée dans quelques études (Tableau 7), seul l'étude de De Gennaro *et al.* (2012) présente une simulation de Monte

Carlo pour analyser la propagation des incertitudes. Il convient toutefois de préciser que la simulation n'a porté que sur l'évaluation des coûts et non sur l'évaluation des impacts environnementaux.

Tableau 7. Caractéristiques des données

Auteur	Analyse de la qualité des données/simulation de Monte Carlo	Données sur les infrastructures et les biens immobiliers
(Nicoletti <i>et al.</i> , 2001)	?	?
(Notarnicola <i>et al.</i> , 2004)	non/non	?
(Georgiou <i>et al.</i> , 2006)	oui/non	non
(Cortes, 2006)	oui/non	non
(Avraamides et Fatta, 2006)	oui/non	non
(Olivieri <i>et al.</i> , 2005)	non/non	non
(Olivieri <i>et al.</i> , 2007)	non/non	non
(Avraamides et Fatta, 2008)	oui/non	non
(De Gennaro <i>et al.</i> , 2012)	oui/oui	non
(Salomone et Ioppolo, 2012)	non/non	non
(Guzman et Alonso, 2008)	non/non	oui
(Kaltsas <i>et al.</i> , 2007)	non/non	oui
(Recchia <i>et al.</i> , 2011)	non/non	non
(Michalopoulos <i>et al.</i> , 2011)(EPD, 2012a)	oui/non	non
(Dessane, 2003)	non/non	oui
(EPD, 2012b)	non/non	non
(Fiore <i>et al.</i> , 2009)	non/non	oui
(Neri, 2006)	?	oui

4.3.2.3 Machine, infrastructure et biens immobiliers

Les machines, les infrastructures et les biens immobiliers que possèdent et utilisent les professionnels du secteur varient drastiquement d'une entreprise à l'autre particulièrement en fonction de la taille de l'exploitation ou du moulin. Par ailleurs, leur prise en compte en analyse de cycle de vie demeure un challenge tant il s'avère complexe d'estimer les impacts du cycle de vie de ce genre de produit. C'est pourquoi seulement six études en tiennent compte dans leur analyse (Tableau 7). Le document PCR conseille de ne pas inclure dans une ACV de l'huile d'olive les biens dont la durée de vie excède trois années (EPD, 2010). Deux principaux arguments sont avancés par d'autres auteurs pour exclure les machines, les infrastructures et les biens immobiliers : (i) l'absence de données d'inventaires fiables concernant ce type de biens (Avraamides et Fatta, 2006; Cortes, 2006; Georgiou *et al.*, 2006) et (ii) le manque de pertinence de ce genre de biens dans une perspective d'analyse de cycle de vie (Salomone et Ioppolo, 2012). Aucune analyse de sensibilité n'a cependant été menée en vue de corroborer une telle conclusion dans le secteur oléicole.

4.3.2.4 Stockage du carbone dans les parties permanentes de l'arbre

L'huile d'olive peut être comparée par les consommateurs à d'autres types d'huiles végétales comme l'huile de colza ou l'huile de palme. Cependant, les professionnels du secteur soulèvent la question de la différence entre des cultures pérennes et des cultures annuelles. Les oliviers sont réputés pour vivre plusieurs décennies voire plusieurs siècles. Il paraît alors vraisemblable qu'ils jouent un rôle dans le stockage de carbone en l'immobilisant à long terme dans ses parties permanentes (racines, tronc, branches principales). Afin de quantifier le stockage du carbone dans l'olivier, Sofo *et al.* (2005) ont mis en place un protocole scientifique sur 5 ans leur permettant d'apporter une première réponse à cette question cruciale. L'étude a été reprise dans quatre ACV (Avraamides et Fatta, 2006; Cortes, 2006; Georgiou *et al.*, 2006; Michalopoulos *et al.*, 2011).

Outre l'arbre, le sol peut également jouer le rôle de puits de carbone à condition que les fertilisants organiques tels que les grignons ou les résidus de taille soient restitués au sol.

4.3.2.5 Émission dans l'air, dans l'eau et le sol dues à l'application de fertilisants

Pour améliorer les rendements en olive, les oléiculteurs appliquent des fertilisants (minéraux ou organiques) pour apporter l'azote, le phosphore et le potassium indispensables à la croissance des arbres. Néanmoins, une fertilisation mal contrôlée peut mener à des émissions de composés azotés et phosphatés dans l'air, l'eau et le sol. Cette problématique est traitée dans sept études (Avraamides et Fatta, 2008, 2006; Cortes, 2006; De Gennaro *et al.*, 2012; Dessane, 2003; Georgiou *et al.*, 2006; Notarnicola *et al.*, 2004; Salomone et Ioppolo, 2012).

L'application de fertilisants minéraux est responsable des émissions de protoxyde d'azote (N_2O), d'ammoniac (NH_3), et d'oxydes d'azote (NO_x) dans l'air, de nitrates (NO_3^-) et phosphates (PO_4^{3-}) dans l'eau et le sol. Les molécules NH_3 , NO_x , et PO_4^{3-} sont particulièrement émises lors de la pulvérisation des fertilisants minéraux alors que les molécules N_2O , et CH_4 sont davantage générées lors de la dégradation des éléments azotés et de la matière organique. Le calcul de la quantité de ces molécules émises repose sur différentes méthodologies. Les plus utilisées sont celles de Houghton *et al.* (1996), Bouwman (1998), Kroeze et Bogdanov (1997), Audsley *et al.* (1997), *European Center for Ecotoxicology and Toxicology Of Chemicals* (ECETOC, 2000) et Brentrup *et al.* (2000), pour les émissions de N_2O , NH_3 et NO_3^- . La détermination des émissions de CH_4 résultent des travaux de Bouwman (1998). Les études les plus récentes sont fondées sur les plus anciennes, à savoir Houghton *et al.* (1996), Bouwman (1998), Audsley *et al.* (1997) et ECETOC (2000). Finalement, les mécanismes qui régissent les émissions de phosphates dans l'eau et dans

le sol sont décrits dans les travaux de Webb *et al.* (2000), Milà i Canals (2003) et Nemecek *et al.* (2004).

Pendant la phase agricole du cycle de vie, les maladies et parasites sont combattus avec des pesticides (fongicides, herbicides et insecticides), molécules dont la fonction repose sur la destruction de certains organismes vivants. Il apparaît donc qu'ils présentent un danger pour les écosystèmes et pour l'être humain. Toutes les études qui évaluent les émissions dues à la fertilisation quantifient également les émissions de pesticides en utilisant la méthode d'Hauschild (2000).

4.3.2.6 Érosion des sols

Le labour et la culture intensive et super intensive des oliviers mènent à l'érosion des sols, phénomène néfaste pour les écosystèmes pédologiques, pour la régulation des nutriments et pour le stockage de l'eau. Une des solutions pourrait être l'épandage des grignons et margines afin de restituer à la terre une partie de la matière organique exportée. Cependant, la composition des effluents solides (grignons) et liquides (margines) soulèvent d'autres problèmes. En effet, par leur composition riche en acides organiques, en lipides, en alcools et en polyphénols, les résidus présentent un potentiel phytotoxique pour les sols, les écosystèmes aquatiques voire pour l'air (Roig *et al.*, 2006). Par ailleurs, l'épandage des grignons et margines apporte une grande quantité de matière organique qui, nécessairement, se dégradera et produira entre autres du méthane (CH₄), de l'oxyde nitreux (N₂O) et du dioxyde de carbone (CO₂) (Bouwman, 1998).

4.3.2.7 Transports

Le transport des travailleurs est inclus dans une seule étude (Notarnicola *et al.*, 2004). Le guide PCR suggère de compter les transports liés aux voyages d'affaire du personnel, mais pas les trajets quotidiens entre la résidence du travailleur et son lieu de travail (EPD, 2010).

La distribution demeure une phase de transport complexe et extrêmement variable d'un moulin à l'autre et d'une année sur l'autre. En conséquence, cette phase n'apparaît que dans les calculs de quatre ACV (EPD, 2012b ; Fiore *et al.*, 2009 ; Michalopoulos *et al.*, 2011 ; Neri, 2006). Le guide PCR propose de calculer la distance moyenne parcourue par chaque mode de transport (transport maritime, fret aérien, transport ferroviaire et transport routier par camion) (EPD, 2010).

4.3.3 Évaluation des impacts

4.3.3.1 Outils logiciels

L'évaluation des impacts a été réalisée à l'aide d'outils dédiés à l'ACV dans 12 des 18 études. Le logiciel SimaPro (version 5 à 7) constitue le logiciel le plus utilisé (par 16 études), les deux autres étant GEMIS (version 4.5) et Gabi (version 4.4).

4.3.3.2 Catégories d'impacts

La caractérisation des impacts a été réalisée à partir d'un large panel de méthodes d'évaluation. En fonction de l'année de l'étude, les méthodes retenues correspondent aux plus réputées et les plus reconnues dans le milieu de l'ACV que sont les méthodes Ecoindicateur 99 et CML 2000. En effet, les méthodes plus récentes d'impacts 2002+ et de ReCiPe sont basées sur les deux précédentes. La catégorie la plus évaluée reste le réchauffement climatique dont les résultats sont exprimés en kg CO_{2eq}. Excepté l'étude d'Avraamides et Fatta (2008) qui se limite à l'étape d'inventaire, toutes les ACV sur l'huile d'olive évaluent cet impact à partir de la même méthode. La déplétion de la couche d'ozone constitue également une catégorie d'impact dont la méthode de caractérisation est unique. Les résultats sont exprimés en kgCFC11eq. Les autres catégories d'impacts diffèrent d'une étude à l'autre ou reposent sur des méthodes de caractérisation différentes. Parmi les quatre études qui incluent une analyse des coûts, une seule mène une analyse des coûts du cycle de vie complète en ce qu'elle inclut les externalités dues aux impacts environnementaux (Notarnicola *et al.*, 2004). Les autres analyses qui étudient les coûts ne considèrent que les coûts du travail et ceux des intrants matériels et énergétiques directs (De Gennaro *et al.*, 2012; Espi *et al.*, 2013; Neri, 2006; Recchia *et al.*, 2011)

Finalement, des étapes de normalisation puis de pondération sont réalisées dans quelques études afin de réduire le nombre d'indicateurs environnementaux.

4.3.3.3 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité n'a été réalisée que dans trois études (De Gennaro *et al.*, 2012 ; Neri, 2006 ; Olivieri *et al.*, 2005).

4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire l'agro-industrie oléicole à travers les trois volets de la durabilité et ainsi soulever les enjeux environnementaux, sociaux et économiques auquel elle est confrontée. Le secteur n'échappe donc pas à la nécessité d'évaluer sa durabilité et celle de ses entreprises et produits. L'analyse du cycle de vie du système de production de l'huile d'olive a été utilisée pour déterminer les impacts environnementaux et des coûts. Les impacts sociaux n'ont pas été évalués, par conséquent, aucune analyse de la durabilité du cycle de vie n'a été menée. L'analyse des ACV de l'huile d'olive déjà menées a permis de faire émerger des manques relatifs :

- ✓ aux données issues de cas d'étude pour enrichir les bases de données d'ACV ;
- ✓ à l'extension des limites du système notamment par la prise en compte des infrastructures ;
- ✓ à l'évaluation de la qualité des données et la propagation de l'incertitude à travers une simulation de Monte Carlo ;
- ✓ à l'évaluation de la durabilité qui doit être réalisée pour compléter les analyses environnementales du cycle de vie.

Partie B. Définition de l'approche

En réponse aux verrous identifiés dans la partie A, la partie B présente, caractérise et implémente l'approche proposée en s'appuyant sur les outils de modélisation de l'ingénierie système et de l'ingénierie d'entreprise.

Actions de dissémination liées à cette partie :

(Busset *et al.*, 2013c) *An Integrated Approach for Designing an Agricultural Process Guided by Sustainable Evaluation: Application to Olive-Oil Production*. INSIGHT 16, n° 2 (2013): 32-34.

(Busset *et al.*, 2014) *Integrated approach for agro-process design guided by sustainability evaluation: application to the olive oil production*. International Conference WASTEENG 2014 (à venir), Rio de Janeiro, Brésil.

(Busset *et al.*, 2012e) *Approche intégrée dirigée par les modèles pour l'éco-conception des procédés agro-industriels: étude de la production d'huile d'olive*. Journée nationale GDR MACS/STP GDR Easy-DIM, Albi, France.

(Busset *et al.*, 2012d) *Approche intégrée dirigée par les modèles pour l'écoconception des procédés agro-industriels: étude de la production d'huile d'olive*, Forum Académie-Industrie AFIS 2012, Palaiseau, France.

Chapitre 5. Nécessité

Avant de définir l'approche proposée, il paraît nécessaire d'en rappeler la nécessité en reprenant les tensions générées et les verrous scientifiques mis en lumière par l'étude du contexte général présenté dans la partie A.

5.1 Verrous scientifiques

5.1.1 Évaluation de la durabilité

5.1.1.1 Nécessaire durabilité

Bien que le concept fasse désormais partie de la vie courante, une définition simple du développement durable semble difficile à dégager tant il repose sur un nombre certain de présupposés (Vivien *et al.*, 2013). Gagnon *et al.* rappelle dans son article sur l'ingénierie durable que la notion de développement et de durabilité continue d'alimenter les débats car elle repose sur des hypothèses quant aux besoins des générations futures (Gagnon *et al.*, 2012). Cependant, l'UNEP prend une position forte et rappelle que la définition proposée par Brundtland fait consensus après avoir été remise en question moult fois (UNEP, 2009). Il convient de garder à l'esprit la tension générée par la définition du contexte global dans lequel s'inscrit ce projet de recherche. Dans la suite du manuscrit et à la lumière des différents points de vue sur le développement durable, la durabilité comme objectif global à atteindre sera préférée au développement durable. Ainsi, elle ne qualifiera pas uniquement le développement ni la croissance, mais aussi et surtout les sociétés et, plus généralement, la vie et sa diversité (au sens biologique du terme). Tout ce qui sera qualifié de durable signifiera implicitement qu'il contribue favorablement à la durabilité des sociétés et de la vie.

5.1.1.2 AdCV & évaluation de la durabilité

Les moyens d'évaluation s'avèrent nécessaires pour quantifier les enjeux de la durabilité en définissant et caractérisant des critères et des indicateurs pertinents. L'évaluation de la durabilité est par essence « multi-acteurs » donc « multi-objectifs » et donc « multi-critères ». En se focalisant sur le produit (ou le procédé ou le service), l'analyse de cycle de vie en tant que méthode d'aide à la décision semble occuper une place de premier choix parmi les moyens d'évaluation de la durabilité, en particulier par son approche holistique du cycle de vie. L'analyse de la durabilité du cycle de vie (AdCV) n'étant qu'à ses prémises, il est important qu'elle soit appliquée pour pou-

voir être continuellement améliorée. L'ACV ne suffit pas pour évaluer la durabilité en ce qu'elle rapporte tout à l'unité fonctionnelle qui rend compte d'une seule fonction du produit (procédé ou service). Or la durabilité d'une solution technique passera également par la viabilité économique de la ou des entreprises qui interviennent tout au long du cycle de vie du produit. Ainsi, des outils d'évaluation économique sont nécessaires et doivent être intégrés lors de l'évaluation de la durabilité d'un système. Il convient de rappeler ici les verrous scientifiques relatifs à l'évaluation de la durabilité guidée par la pensée cycle de vie identifiés dans la partie A :

V1. Si une méthode d'évaluation de la durabilité du cycle de vie semble possible, comment résoudre le problème de l'intégration des volets environnemental, économique et social de l'ACV.

V2. L'ACV est une méthode d'évaluation orientée produit bien qu'elle adopte un point de vue fonctionnel caractérisé par une approche processus. Est-il possible d'intégrer d'autres méthodes d'évaluation pour construire une méthode d'évaluation de la durabilité d'un système ?

V3. Comment l'analyse multicritère peut-elle aider à combiner les indicateurs hétérogènes des méthodes d'évaluation issus des différents volets de la durabilité ?

Par ailleurs, les méthodes d'évaluation de la durabilité font émerger la nécessité d'être testées et améliorées pour être utilisées de manière toujours plus précise et juste dans un maximum de contexte et sur un maximum de systèmes afin de diffuser le concept.

5.1.2 Ingénierie d'entreprise & conception durable de systèmes

5.1.2.1 Ingénierie, entreprise & décision

L'ingénierie en tant qu'opération (ensemble d'actions) qui vise à concevoir et à développer des produits, des procédés ou des services (à l'aide d'autres produits, procédés et services) offre une connaissance aigüe des systèmes sociotechniques, de leurs ressources, de leur organisation, de leur fonctionnement et des informations qu'elles utilisent. Elle se place donc comme un champ de l'activité humaine la mieux à même d'évaluer la durabilité.

En outre, l'entreprise qui orchestre l'activité d'ingénierie va se placer comme un système prépondérant vis-à-vis de la durabilité, notamment par son influence sur les systèmes et sous-systèmes et par la connaissance qu'elle est susceptible d'avoir sur les cycles de vie des systèmes et processus qui la composent. L'entreprise est un système de systèmes en mutuelle interaction. Chaque sys-

tème peut être modélisé dans un objectif précis par un acteur d'un niveau de décision donné selon lequel une approche de conception basée sur les modèles sera favorisée. Pour qu'une entreprise soit agile face à un environnement versatile et qu'elle connaisse parfaitement tous les systèmes qui la composent et toutes les interactions entre ces sous-systèmes, les acteurs du niveau de décision stratégique doivent être aidés par des modèles transversaux qui lient voire qui intègrent tous les modèles des tous les autres sous-systèmes. La figure 14 montre les différents niveaux de granulométrie du système « entreprise ». À chaque niveau se trouvent des systèmes et des processus en interaction entre eux mais aussi avec les systèmes et processus des autres niveaux. La complexité des interactions rend extrêmement complexe l'intégration des modèles des systèmes et processus de l'entreprise, en particulier par la diversité des formalismes utilisés pour les différents modèles. L'ingénierie d'entreprise ne semble pas avoir formalisé ni automatisé les interactions entre le système et son environnement (au sens économique, social, écologique).

Une décision est définie comme un « acte par lequel quelqu'un opte pour une solution » (Larousse, 2013). Elle permet d'orienter les activités à réaliser, lesquelles reposent en partie sur un certain nombre de systèmes dont le cycle de vie possède des conséquences environnementales, économiques et sociales. Apparaît alors évident le lien entre la décision interne à un système et les conséquences sur l'environnement extérieur. Il existe plusieurs niveaux de décision selon le système considéré dans l'entreprise (stratégique, tactique, opérationnel) (Figure 14).

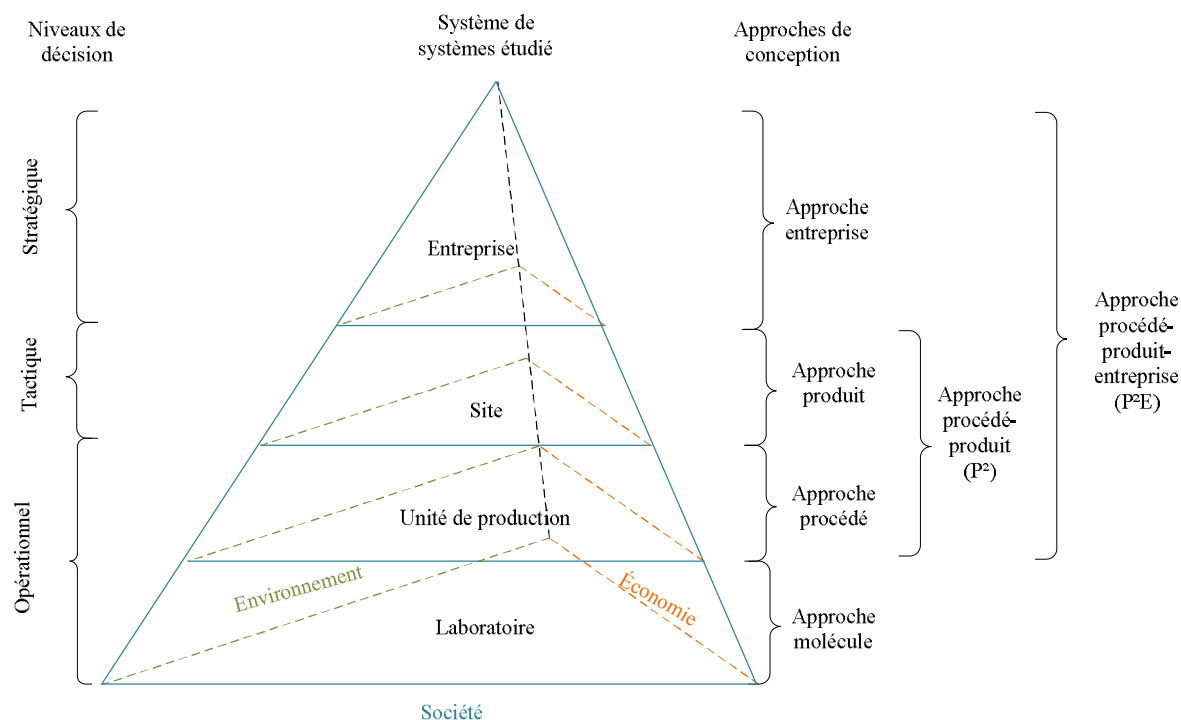


Figure 14. Pyramide des systèmes dans une entreprise (inspiré de Heintz *et al.* (2014))

Un des enjeux de la prise de décision réside dans l'alignement des décisions et des contraintes mutuelles et parfois contradictoires qu'elles s'imposent les unes aux autres. Ces décisions peuvent en général s'appuyer sur des approches de conception basée sur des modèles propres à un métier ou à un système.

5.1.2.2 Ingénierie & approches de conception

L'étude de la bibliographie a montré que la conception d'un système constituait une phase clef dans le cycle de vie d'un système et plus généralement dans une démarche d'ingénierie. Elle permet de prévoir le comportement d'un système face à un environnement changeant ou pour répondre à des besoins changeant. Tous les systèmes et sous-systèmes qui composent l'entreprise passent par une phase de conception. Selon le niveau de granulométrie du système, différentes approches de conception basée sur les modèles peuvent être mises en œuvre. Les quatre grandes approches de conception sont par ordre croissant : la molécule, le procédé, le produit et l'entreprise (Figure 14).

En général, toute approche d'un système à un niveau donné intègre un système d'un niveau inférieur. Si aucun modèle n'existe pour ce système d'un niveau inférieur, il est considéré comme une boîte noire, c'est-à-dire qu'il ne repose pas sur un modèle rigoureux au sens phénoménologique.

Des approches hybrides basées sur le couplage d'au moins deux approches paraissent nécessaires pour faire communiquer les experts de différents métiers avec des formalismes différents mais dont les activités sont liées. Dans ce genre d'approche, les systèmes de niveau inférieur passent d'un modèle en boîte noire à un modèle en boîte grise ou blanche selon la finesse du modèle. Il convient de souligner qu'un modèle en boîte noire peut constituer l'un des éléments d'un modèle en boîte grise. Dans cette représentation, la boîte blanche est considérée comme un « ultime » modèle qui permet de prédire le comportement d'un système sans avoir recours à des modèles plus avancés. Une boîte blanche est donc relative et dépend du niveau de précision requis lors de la modélisation. Un exemple de passages successifs de boîte noire à boîte grise est fourni dans la figure 15.

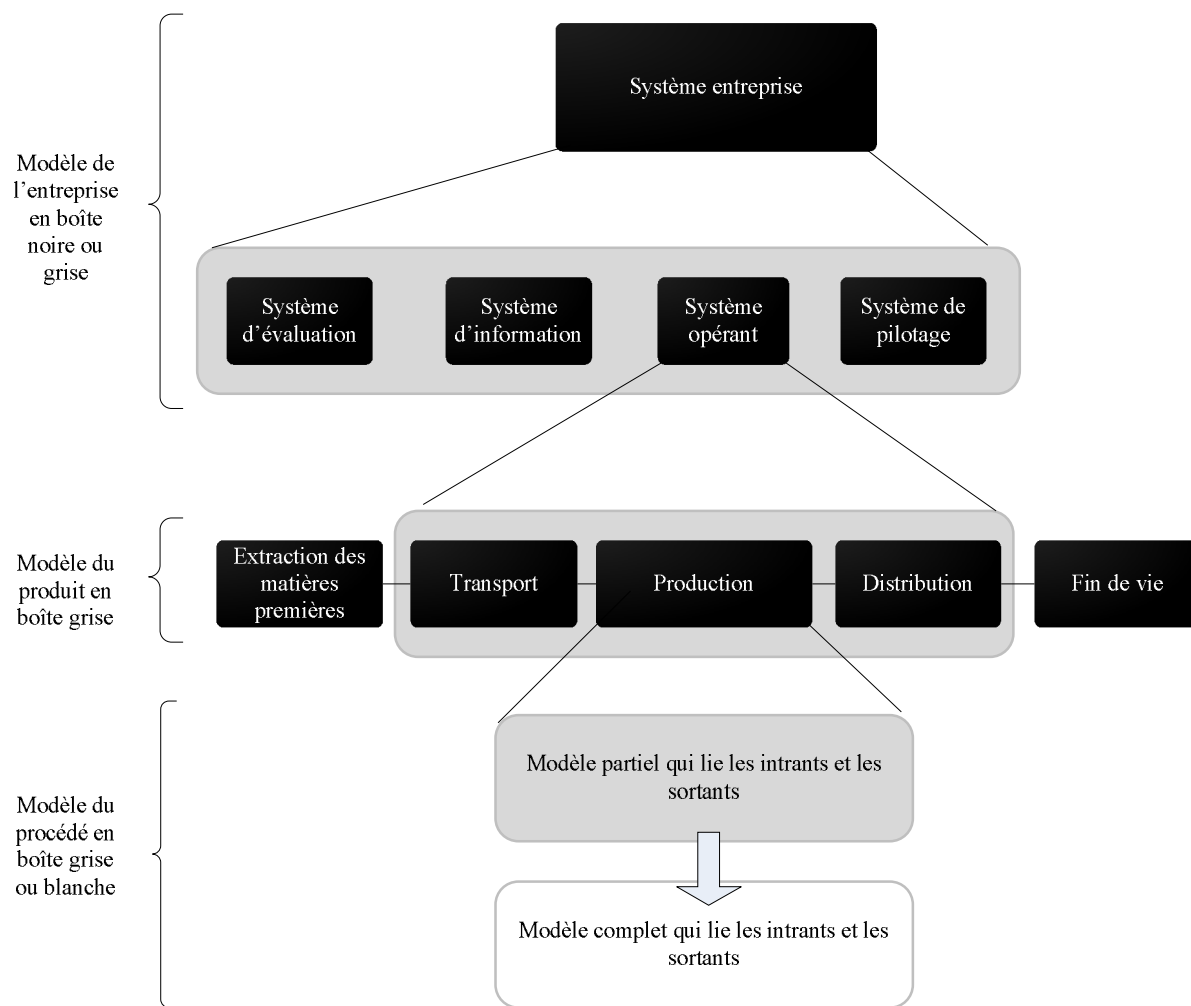


Figure 15. Approche systémique orientée modèle

Dans les travaux de Gillani (2013), une intégration entre le niveau de modélisation des procédés et celui de modélisation d'un produit a été réalisée. En outre, l'intérêt d'un tel couplage consiste en l'utilisation des résultats en vue d'une prise de décision au niveau tactique voire stratégique de l'entreprise. Le couplage entre l'approche molécule et l'approche produit trouve une proposition dans les travaux de thèse de Heintz (2012).

D'un point de vue interaction entre le système et son environnement extérieur, la conception classique n'intègre pas systématiquement les conséquences d'un système sur son environnement. Or la nécessité de la durabilité s'impose à la conception. L'intégration de l'évaluation de la durabilité lors de la phase de conception d'un système permet de réduire les coûts, les impacts environnementaux et les risques liés à la méconnaissance du futur système. Toutefois, une approche d'évaluation ne peut-elle pas être appliquée à toutes les phases du cycle de vie ? Afin de guider les

ingénieurs sur la route de la conception durable, Gagnon *et al.* ont mis en évidence des « ombres » (*shades*) de la durabilité selon six dimensions qui permettent de situer toute approche de conception (Gagnon *et al.*, 2012) :

- ✓ la structure du processus de conception ;
- ✓ le champ de l'étude couvert, c'est-à-dire le nombre de problème de la durabilité traités ;
- ✓ la pertinence des indicateurs sélectionnés ;
- ✓ la précision des outils d'évaluation ;
- ✓ les améliorations potentielles à attendre des alternatives évaluées ;
- ✓ la prise de décision.

L'intégration des moyens d'évaluation aux moyens de conception s'avère nécessaire pour faire émerger des indicateurs évoluant avec les modifications de la conception du système. Actuellement, le couplage des outils de modélisation de procédé et d'analyse de cycle de vie montre une première approche de couplage entre des moyens d'évaluation environnementaux et économiques et des moyens de conception basée sur les modèles. En revanche, il ne semble pas encore exister d'approche qui couplerait des aspects sociaux et des processus d'entreprise à l'évaluation environnementale et économique et au modèle de procédé.

Finalement, la modélisation d'entreprise et des systèmes étant historiquement tournée vers les systèmes aéronautiques, aérospatiaux, automobiles et de l'industrie du pétrole, elle doit se tourner vers d'autres industries comme l'agro-industrie.

Trois verrous scientifiques soulevés dans la partie A sont rappelés ici.

V4. En présupposant que les outils de l'ingénierie d'entreprise et des systèmes puissent être appliqués à un système agro-industriel, comment peuvent-ils aider à le modéliser ?

V5. Comment la durabilité et son évaluation peuvent-elles être systématiquement intégrées dans les modèles d'une entreprise et orienter les décisions stratégiques ?

V6. Comment les différents modèles qui constituent le modèle d'une entreprise peuvent-ils être couplés ?

5.2 Propositions

Face à la nécessité d'intégrer l'évaluation de la durabilité à la prise de décision stratégique et face à la nécessité pour les décideurs de s'appuyer sur une connaissance toujours plus complète, cette thèse propose une approche Procédé-Produit-Entreprise P²E pour l'aide à une décision durable. L'encadré qui suit rassemble les propositions (Px.) qui répondent aux verrous (Vx.).

P1. Intégrer les volets environnemental, économique et social de l'ACV par la réalisation d'un inventaire unique puis par une analyse multicritère.

P2. Pour élargir l'approche produit de l'ACV, il est proposé d'une part de modéliser l'entreprise et le procédé et d'autre part de coupler systématiquement une évaluation économique de l'entreprise.

P3. L'analyse multicritère peut permettre de considérer différents critères. La proposition consiste à formaliser les critères caractérisés par la méthode grâce aux outils de l'analyse multicritère.

P4. Bien qu'un système agro-industriel comporte une phase de son cycle de vie qui relève de phénomènes biologiques (agronomiques), il s'agit cependant de système et de processus. Afin de formaliser les modèles de tels systèmes, les concepts de l'ingénierie d'entreprise et de l'ingénierie système sont appliqués.

P5. La durabilité peut être systématiquement intégrée dans les processus de décision en intégrant des modèles d'évaluation aux modèles du système. Un nouvel agent intégrateur est proposé qui facilite et coordonne l'intégration du concept de durabilité à tous les niveaux de décision. Il est proposé une approche structurante de six étapes. Cette approche guidée par la pensée cycle de vie est étendue au processus de décision de manière à mettre en exergue son intégration concrète dans les décisions.

P6. Il est finalement proposé de coupler les différents modèles du système « procédé-produit-entreprise » par la définition d'une première ontologie.

Les trois chapitres qui suivent proposent successivement de présenter les caractéristiques génériques de l'approche proposée, ses caractéristiques partielles dans le cadre de son application au secteur agro-industriel et finalement une implémentation dédiée à l'agro-industrie oléicole.

Chapitre 6. Caractérisation générique

Pour tout ce qui concerne la conception et le développement d'une solution technique à un besoin formulé par une partie prenante, l'évaluation de la durabilité doit être intégrée à la démarche d'ingénierie dès la conception. Pour qu'une entreprise prenne une décision durable pour adopter une stratégie durable (laquelle rassemble beaucoup d'objectifs qui répondent à la satisfaction de nombreux besoins et parties prenantes), elle doit pouvoir concevoir et développer des systèmes (notamment de produits) en connaissant leurs conséquences sur l'environnement, l'économie et la société. Une telle connaissance repose sur la modélisation des systèmes liés aux actions nécessaires à la satisfaction des besoins et sur celle de leurs conséquences.

6.1 Objectifs

L'approche proposée est donc une approche d'évaluation intégrée basée sur la modélisation du système « procédé-produit-entreprise ». Elle a pour objectif de caractériser les impacts environnementaux, sociaux et économiques d'un système en vue d'aider à la décision pour la durabilité de ce système. Elle s'inscrit dans une démarche globale d'aide à la décision. À cet effet, elle aboutit à des indicateurs utilisables dans l'élaboration d'un choix.

6.2 Portée

L'approche peut s'appliquer à des systèmes de procédé-produit-entreprise aux phases de conception préliminaire, conception détaillée et d'opération. L'approche est générique en ce sens qu'elle s'applique à n'importe quel système de systèmes sociotechniques. Elle fait appel à tous les points de vue (Figure 16).

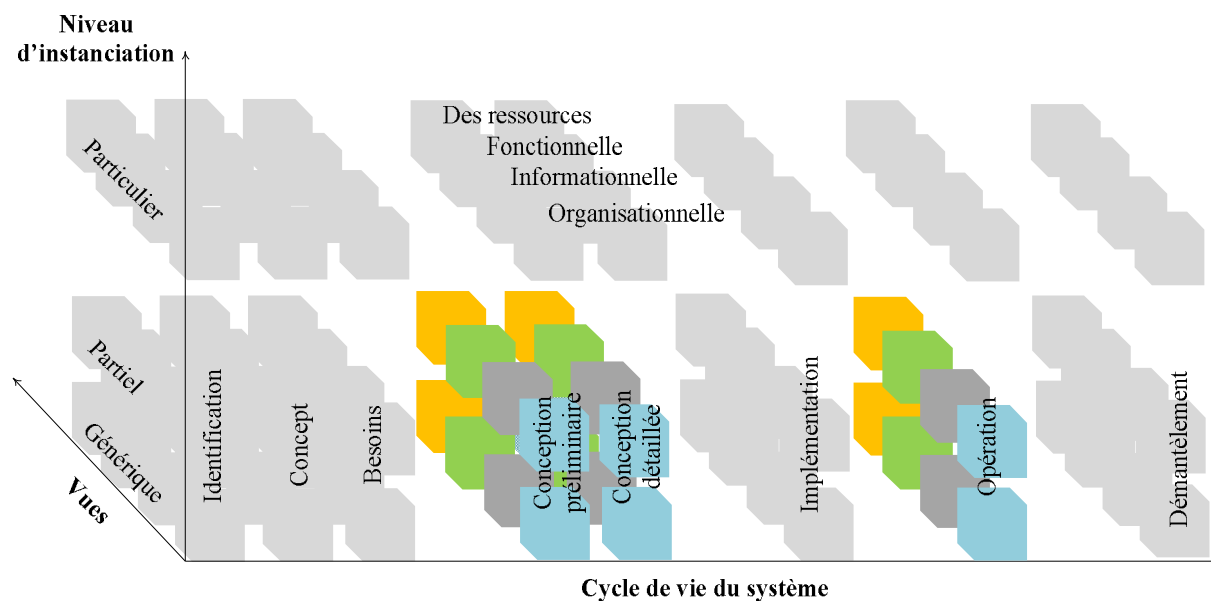


Figure 16. Portée de l'approche proposée dans un modèle de système d'entreprise

Par ailleurs, en tant que méthode d'aide à la décision, elle s'inscrit dans un processus d'aide à la décision classique (Figure 17). L'approche proposée remplit les trois premières phases du processus de décision à l'instar des travaux de Heintz (2012). Néanmoins, la phase d'intelligence et la phase de choix sont simplifiées. Dans ce processus de décision, l'approche P²E trouve son utilité principale dans le sous-processus de conception des alternatives sur lesquelles vont porter les choix.

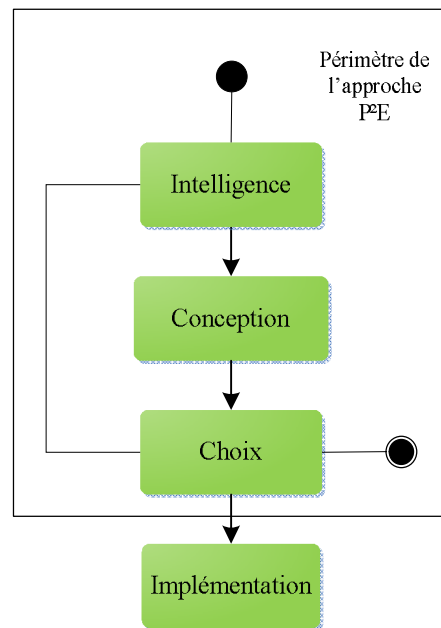


Figure 17. Approche P²E et processus de décision

L'approche P²E d'aide à la décision offre plusieurs opportunités :

- ✓ réaliser un choix technologique ;
- ✓ réaliser un choix de chaîne logistique ;
- ✓ réaliser un choix d'intrants ;
- ✓ communiquer sur la durabilité d'un produit ou d'un service.

Selon la portée de l'application visée, le degré d'exhaustivité de l'approche peut varier. À chaque variante de ce degré d'exhaustivité va correspondre un niveau d'effort de production de modèle. Quatre degrés d'exhaustivité de l'approche P²E sont proposés ici :

- ✓ un degré Procédé-Produit-Entreprise dans lequel le système de procédé est un modèle en boîte grise ou blanche, le système de produit est un modèle en boîte grise ou blanche et le système d'entreprise est un modèle en boîte grise ou blanche. Ce degré se trouve bien adapté à la conception détaillée ;
- ✓ un degré Produit-Entreprise dans lequel le système de procédé est en boîte noire tandis que le système de produit et le système d'entreprise sont en boîte grise ou blanche. Ce degré est particulièrement adapté pour la conception préliminaire ;

- ✓ un degré Procédé-Produit dans lequel seul les modèles de produits et de procédés sont établis avec un modèle en boîte grise ou blanche. Ce degré à la conception détaillée;
- ✓ un degré Produit dans lequel seul le produit est modélisés en boîte grise. Un tel degré est utile lors de la phase d'opération pour la réalisation d'audit, de certification ou encore de communication.

La définition de ces degrés d'exhaustivité se traduit par la possibilité d'utiliser les modèles à la demande selon leur degré de caractérisation (boîte blanche, grise ou noire). Elle montre également qu'il est possible de retrouver la méthode d'AeCV classique orientée produit pour des applications de communications ou de choix d'intrants. L'approche procédé-produit dérive de la méthode P²E plus globale (Figure 14).

6.3 Structure globale

L'approche P²E est guidée par la pensée cycle de vie et plus précisément par la méthode d'analyse de cycle de vie qui, comme mentionné dans la section 2.3.8, peut s'appliquer à n'importe quel système grâce à la généralité de la notion de cycle de vie, de système et de processus. Cependant, il est proposé de modifier et compléter les quatre étapes classiques de l'ACV afin de faire ressortir l'importance de la modélisation du système et de rendre compte du processus d'aide à la décision dans lequel s'inscrit l'approche P²E. Ainsi, cette dernière est structurée en une séquence de six étapes de manière itérative (Figure 18) :

- ✓ définir les objectifs et le champ de l'étude ;
- ✓ modéliser le système de procédé, le système d'entreprise et le système de produit ;
- ✓ réaliser l'inventaire des données ;
- ✓ réaliser une évaluation multicritère de la durabilité ;
- ✓ interpréter et valider les résultats ;
- ✓ réaliser un choix.

Il convient de préciser que cette structure globale s'applique quel que soit le degré d'exhaustivité.

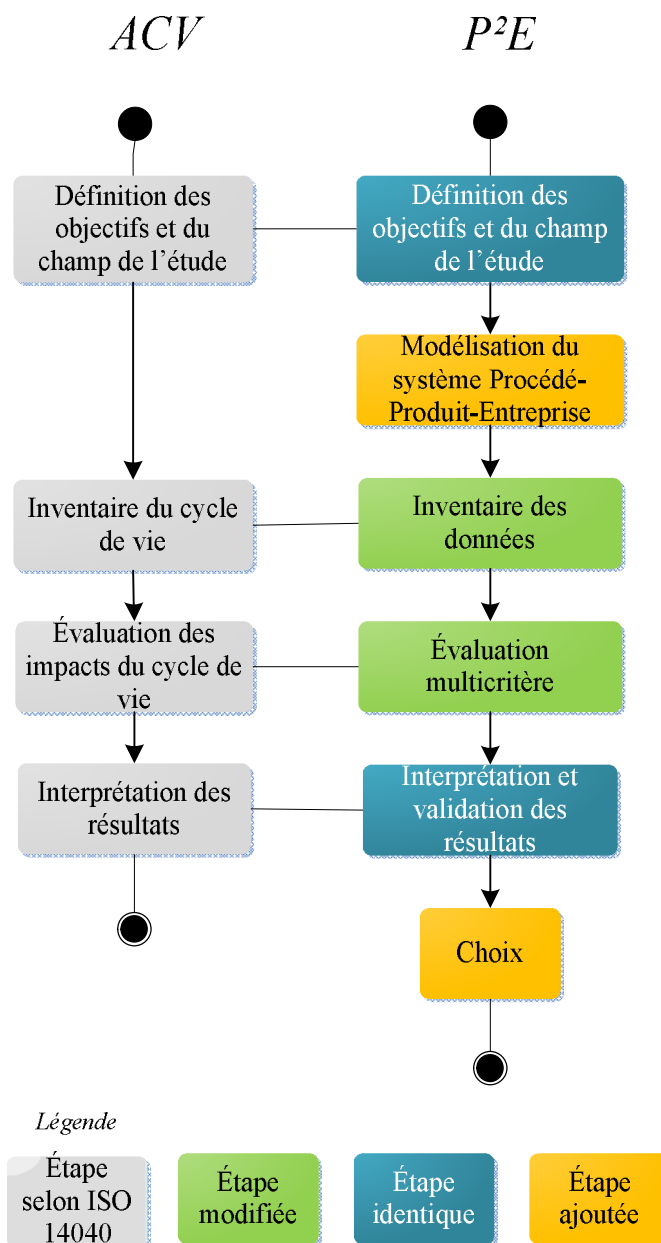


Figure 18. Structure globale de l'approche P²E

La définition des objectifs et du champ de l'étude s'inspire de la méthode d'ACV. Elle est par ailleurs une étape indispensable à un grand nombre de méthodes de résolution de problème. Les objectifs et les applications envisagées pour les résultats sont définis dans cette première étape. Pour le modèle de produit, une fonction du système de produit et l'unité fonctionnelle correspondante sont également décrites. Elle est liée au sous-processus « intelligence » du processus de décision.

La deuxième étape permet de décrire clairement l'entreprise, le produit et le procédé constituant le système de systèmes. Les modèles de ces systèmes sont formellement établis et intégrés entre eux. Cette étape est en générale une sous-étape de l'étape inventaire du cycle de vie de la méthode d'ACV. Elle est liée au sous-processus « conception » du processus de décision.

La réalisation de l'inventaire des données constitue la troisième étape de l'approche P²E. À l'instar de la méthode d'ACV, l'inventaire consiste à récolter les informations de flux de matière et d'énergie qui transitent à travers les systèmes. Néanmoins, dans la présente proposition, il faut insister sur l'extension du type de données à des données qualitatives, quantitatives et semi-quantitatives concernant les volets économiques, sociales et des paramètres opératoires propres au procédé. Elle est liée au sous-processus « conception » du processus de décision.

La quatrième étape est une généralisation de l'étape d'évaluation des impacts de la méthode ACV. Elle consiste en une analyse de la durabilité dont le but est de réduire le nombre de données d'inventaires en indicateurs de catégories d'impacts. Elle vise à aboutir à un nombre réduit d'indicateurs caractérisant les différents aspects de la durabilité, à savoir l'environnement, l'économie, la société. Elle retient également des indicateurs de qualité des résultats déterminés notamment par l'analyse de la qualité des données. Elle est liée au sous-processus « conception » du processus de décision.

L'interprétation et la validation des résultats constituent l'étape primordiale à la fin de laquelle va pouvoir être mis en œuvre le processus de décision. En effet lors de cette cinquième étape tirée de la méthode ACV, les résultats de l'inventaire et de l'évaluation vont permettre une analyse fine des scénarios ou configurations du système. La validation des résultats est réalisée à l'aide de l'expertise des différents acteurs qui ont participé à l'étude. Leur expertise leur permet de vérifier les informations et les ordres de grandeurs des résultats pour ensuite valider les résultats et l'interprétation. Elle est liée au sous-processus « conception » du processus de décision.

L'approche doit aboutir à un choix de (re-)conception ou de diffusion de l'information selon la phase du cycle de vie du système à laquelle est appliquée l'approche. Il n'est alors plus question de remettre en cause les résultats vérifiés et validés par les experts lors de la pénultième étape. Ce choix correspond au sous-processus « choix » du processus de décision.

La transversalité de l'approche P²E et la pluridisciplinarité qui la caractérise induisent l'émergence d'un nouvel acteur au sein de l'entreprise : l'ingénieur en durabilité des systèmes. Ce dernier devra en effet posséder un certain nombre de compétences qu'aucun acteur « classique »

d'une entreprise ne peut rassembler. Parmi ces compétences se trouve évidemment la maîtrise de l'approche P²E qui passe par une connaissance complète des méthodes d'évaluation sur lesquelles cette approche repose et des enjeux liés à l'utilisation des données indirectes extraites de bases de données. En outre, un tel acteur doit également jouer le rôle d'intégrateur des informations des différents experts et de facilitateur vis-à-vis du processus décisionnel. À cet effet, il doit posséder de solides capacités d'animation, de discussion et de gestion de conflit. L'ingénieur en durabilité des systèmes se positionne donc comme un acteur « systémique » et transversal qui va avoir besoin de tous les acteurs susmentionnés.

D'autre part, différents acteurs liés au système étudié vont collaborer tout au long de l'application de la méthode. Ces acteurs vont endosser différents rôles selon l'étape de la démarche à laquelle ils seront amenés à participer. Il y aura les experts, les managers, les ingénieurs, le responsable de la chaîne logistique et les chercheurs. L'approche P²E fait appel à un processus décisionnel qui détermine la méthode sélectionnée et le nombre d'acteurs qui y participent. Elle est particulièrement adaptée à des techniques collaboratives de groupe (Tavana *et al.*, 2012; Zaraté, 2005).

À chacune des six étapes de l'approche, chaque acteur va générer, transformer ou utiliser des données significatives ou informations qui vont transiter à travers les processus sous forme de message. La figure 19 représente la séquence d'activités qui caractérise l'approche proposée ainsi que les données et informations qui transitent et sont transformées au cours des différentes activités. Elle montre notamment le nombre de supports générés et utilisés pour transformer et échanger les données. Le modèle d'information, dans lequel sont classés tous les documents, bases de données et autres messages, est proposé dans la figure 22.

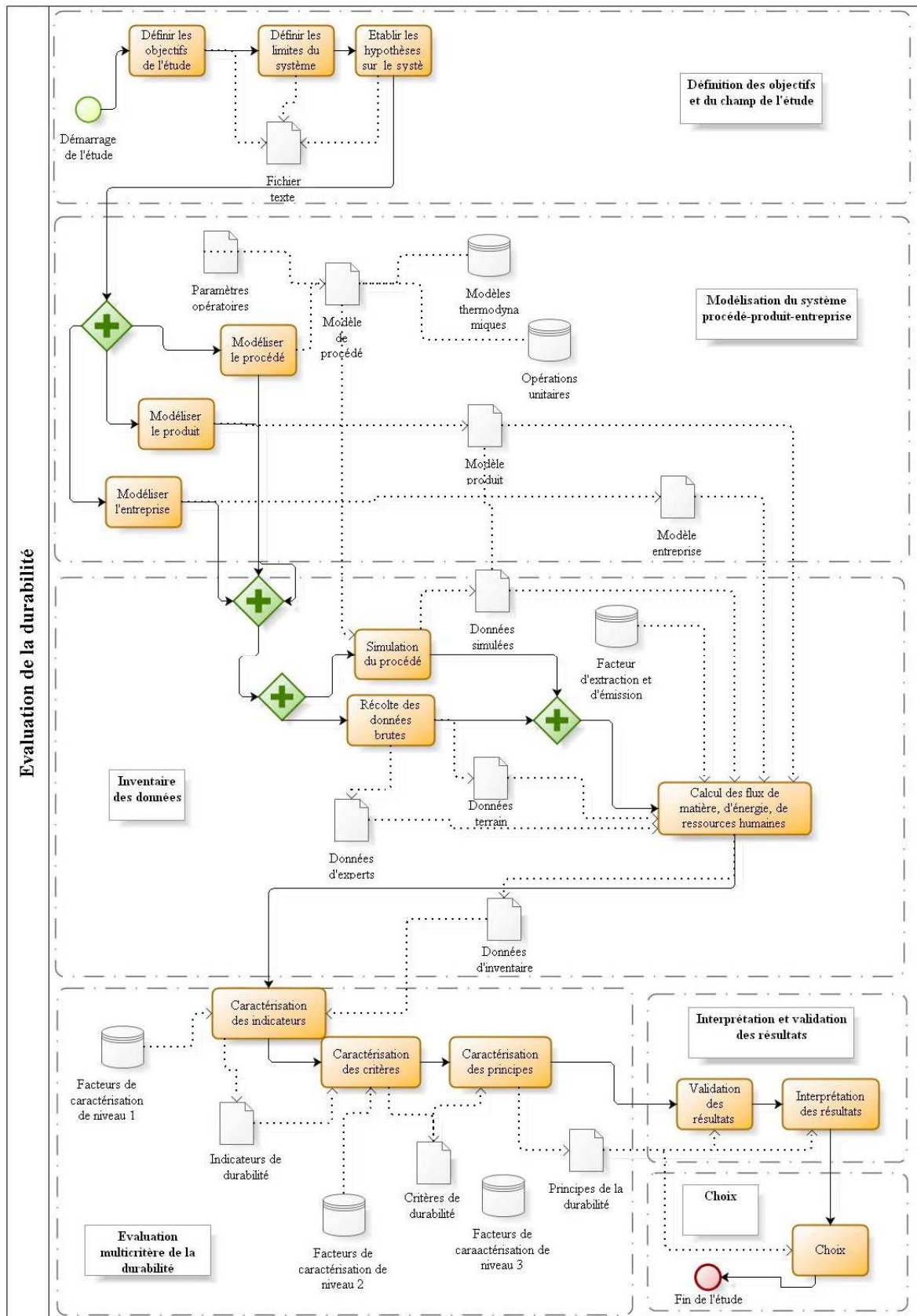


Figure 19. Diagramme d'activité de l'approche P2E avec les informations nécessaires

6.4 Caractéristiques des modèles

Caractériser l'approche P²E revient en partie à caractériser les modèles qui la constituent, à savoir le modèle du système « procédé-produit-entreprise » et les modèles d'évaluation. Un des objectifs de l'approche demeurant l'intégration des modèles, cet aspect est abordé dans une troisième section.

Le système central de l'approche P²E étant l'entreprise par la responsabilité qu'elle endosse vis-à-vis des systèmes procédé et produit, les modèles de systèmes sont présentés en utilisant les langages UML 2.0, BPMN et autres notations non-standardisées pour faciliter la lisibilité. Ainsi, le métamodèle auquel nos modèles se conforment est le métamodèle standard UML de l'*Object Management Group* (OMG).

6.4.1 Modèles du système

L'approche caractérise trois systèmes : le produit, le procédé et l'entreprise. Le procédé est considéré comme un sous-système de l'entreprise et du cycle de vie du produit. Le produit est considéré comme le résultat des activités opérationnelles de l'entreprise (Figure 20). Il est également un sous-système. Le modèle d'évaluation constitue le modèle clef qui oriente l'intégration des modèles des systèmes étudiés par l'approche.

Les systèmes étudiés sont constitués de sous-systèmes au sein desquels sont exécutés des processus. Parmi les grandes catégories de processus se trouvent les processus de mesures et d'évaluation évoqués dans la sous-section 3.2.2.4. Ils sont supportés par le système de mesure et d'évaluation. Afin de simplifier la description et d'alléger le texte, le terme générique « évaluation » sera employé pour désigner soit l'évaluation, soit la mesure. Le système d'évaluation permet d'évaluer les autres systèmes et processus par des mesures et des simulations de modèles. Ce système transversal trouve un responsable dans l'ingénieur en durabilité des systèmes. Les processus d'évaluation vont être transversaux aux autres processus.

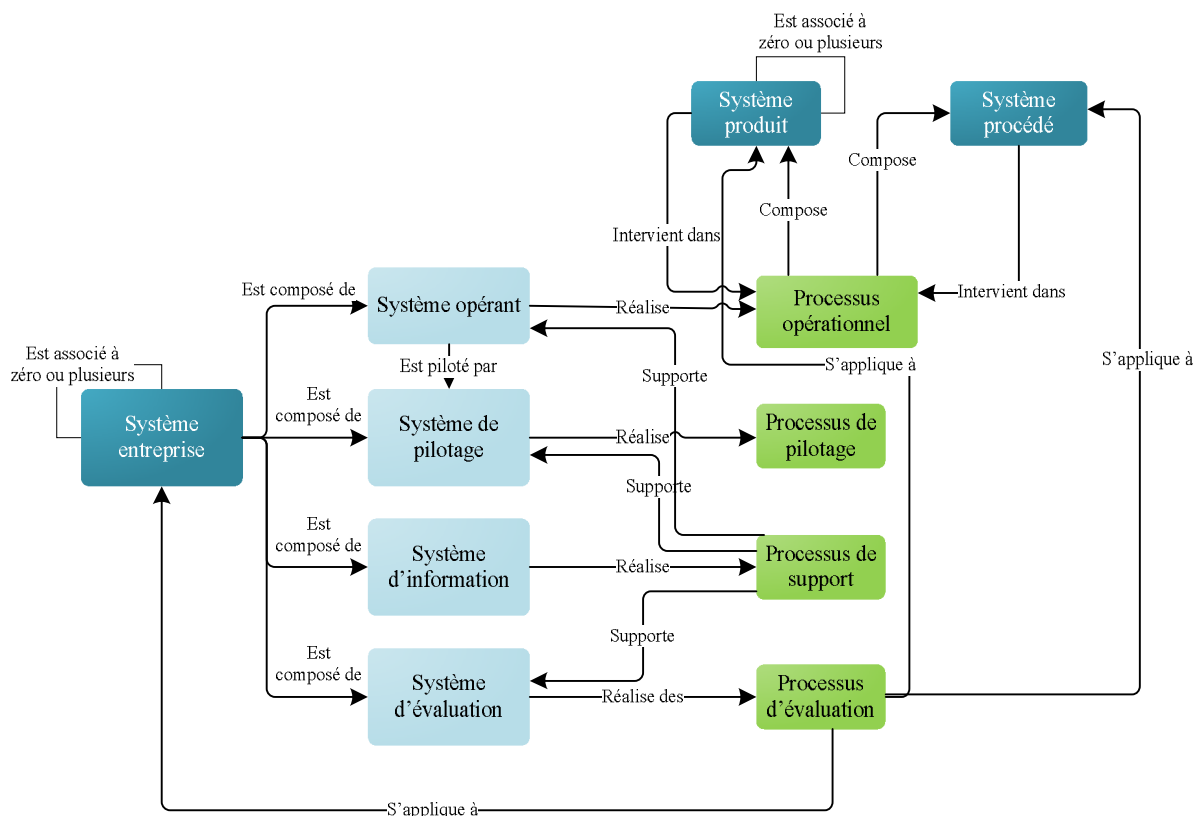


Figure 20. Structure du système d'entreprise et des processus qu'il contient

La complexité du système « procédé-produit-entreprise » se manifeste en outre par le fait que les systèmes de produit et de procédé sont partagés par plusieurs systèmes d'entreprise.

Le modèle d'entreprise que propose d'étudier l'approche utilise des éléments des différentes vues et se situe au niveau des phases de conception préliminaire et détaillée et d'opération du cycle de vie. Le modèle en boîte grise générique de l'entreprise se compose du système d'information, du système de pilotage, du système opérant et du système d'évaluation. Les données globales sur les aspects sociaux et économiques sont extraites à ce niveau.

Le modèle de produit inclut toutes les phases du cycle de vie tangible entendu comme le cycle de vie de l'AeCV, c'est-à-dire sans les phases de recherche et développement et avec les phases d'utilisation et de fin de vie (lesquelles dépassent le cycle de vie de l'entreprise (Figure 15)). Concrètement, il s'agit d'un système de processus au niveau de la chaîne logistique. Le modèle de produit basé sur un système de processus est générique. Il est important de souligner que si l'approche ne s'applique qu'aux phases de conception et d'opération du système « procédé-

produit-entreprise », les modèles qui la constituent peuvent inclure d'autres phases du cycle de vie et ainsi être passés au crible de la durabilité.

Le modèle de procédé de l'approche P²E repose sur une simulation basée sur un bilan matière et un bilan énergie. En ce sens, il est considéré comme générique. Il convient de souligner le présupposé selon lequel tout système sociotechnique complexe utilise au moins un procédé dans la chaîne logistique. Il se justifie par la complexité des systèmes sociotechniques et par le fait qu'un procédé intervient inéluctablement au cours du cycle de vie du produit et de l'entreprise. Selon le degré d'exactitude du modèle (empirique ou phénoménologique) qui lie les sorties du procédé aux entrées, le modèle de procédé est considéré comme une boîte grise (modèle mathématiquement simplifié) ou une boîte blanche (modèle mathématique complexe). Dans le cas d'un degré d'exhaustivité « produit », le modèle de procédé devient une boîte noire et les données d'entrée et de sortie du procédé sont utilisées sans être reliées. Une telle approche réduite ne peut s'appliquer qu'à des phases d'opération du système « procédé-produit-entreprise » lui-même réduit à une approche produit. Il paraît peu intéressant de réaliser des simulations de procédé à ce niveau d'implémentation du système car des mesures sur le système réel offriront une précision plus proche de la réalité que les résultats de la simulation et à moindre coût. Par ailleurs, comme pour le modèle de produit, le modèle du procédé peut inclure le cycle de vie du procédé.

Ainsi, appuyé sur la généricité des modèles des trois systèmes qui le composent, le modèle du système « procédé-produit-entreprise » est également générique.

Finalement, le système P²E peut être vu sous plusieurs points de vue en fonction des acteurs et des objectifs du modèle établi. Afin de caractériser les points de vue adoptés dans le cadre de l'approche P²E, les vues internes d'une entreprise et leurs liens sont illustrés dans la figure 21. Il convient de remarquer que les modèles vont emprunter des éléments de plusieurs vue distinctes.

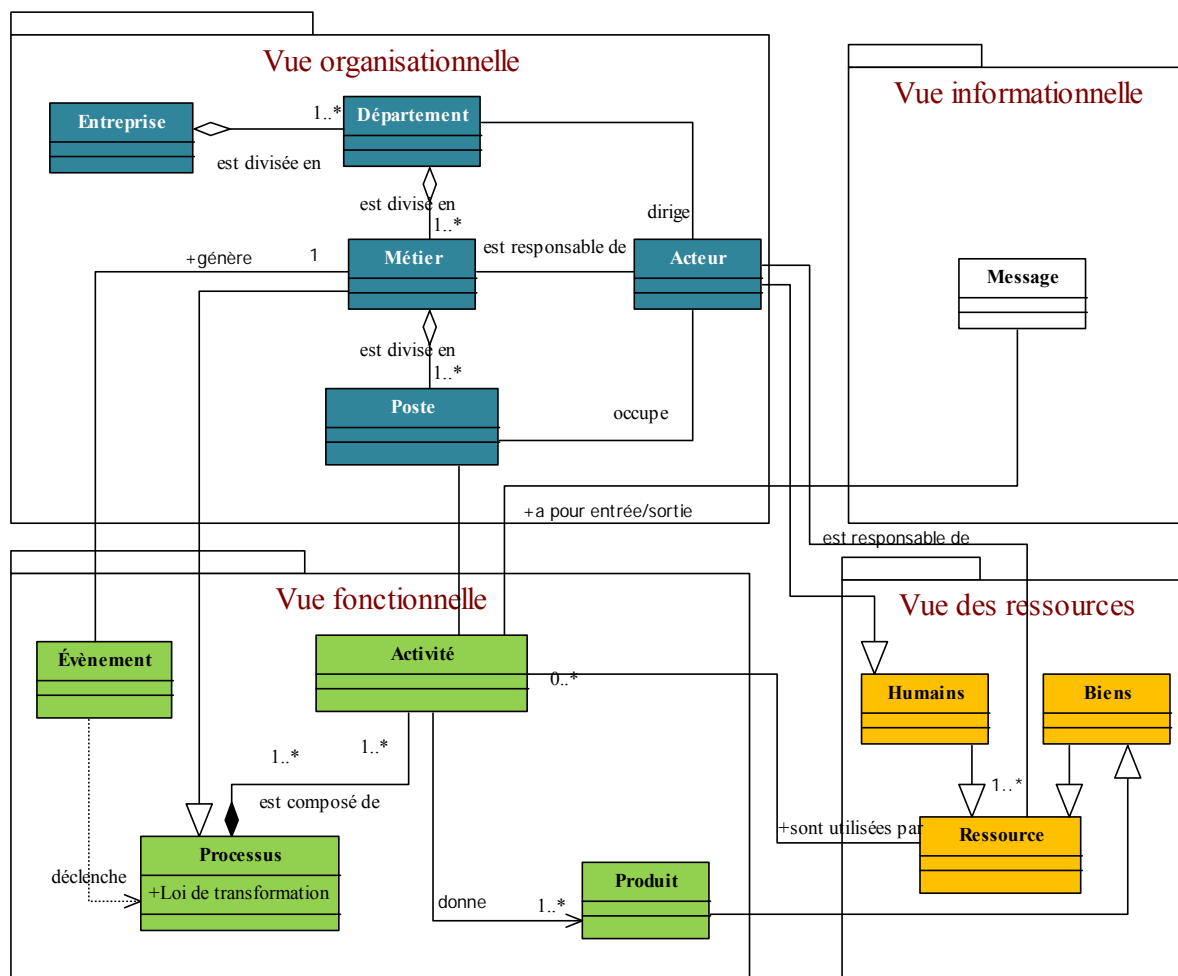


Figure 21. Vues internes de l'entreprise (inspiré de (Vernadat, 1999))

La vue organisationnelle représente l'entreprise en mettant en évidence les liens hiérarchiques entre les acteurs et les processus. Elle établit la liste des acteurs responsables d'un ou plusieurs processus. Le modèle d'entreprise va en grande partie être vu sous cet angle.

La vue fonctionnelle présente l'entreprise sous l'angle d'un enchaînement de processus à travers lesquels de l'information, des ressources humaines et des flux de matières et d'énergie transitent. Le produit est le résultat d'un processus. Les modèles de produit et de procédé vont être essentiellement vus sous cet angle fonctionnel.

La vue informationnelle sur le système représente les données et les documents échangés lors de l'exécution de chaque processus (Figure 22). Elle rassemble les informations des objets d'entreprise (Le Duigou, 2010). La figure 22 reprend le modèle d'information de Gillani (2013)

qui distingue l'information et les supports qui la véhiculent. L'assemblage d'une information et d'un support donne un message échangé au cours d'une activité entre deux acteurs (humains ou machines).

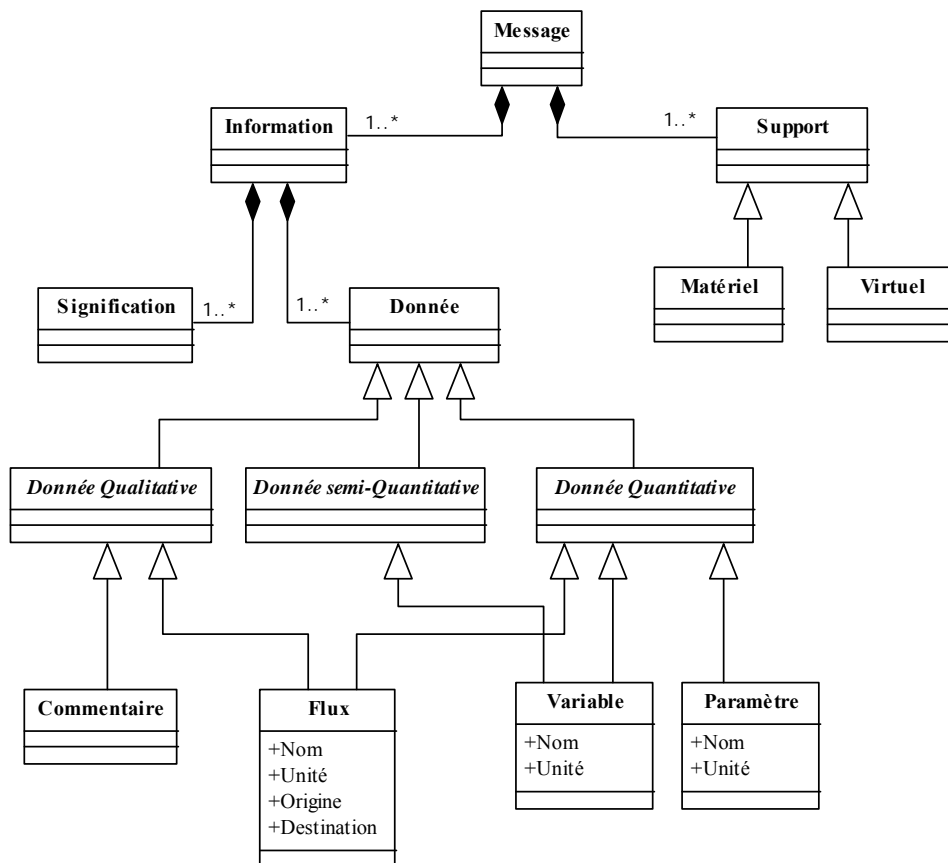


Figure 22. Vue informationnelle, modèle d'information (Gillani, 2013)

La vue informationnelle de l'approche fait appel aux messages échangés entre les différents acteurs. Ces messages sont des données significantes transmises à l'aide de support. Ils peuvent aussi bien concerner la structure du modèle du système « procédé-produit-entreprise » que les données de flux de matière, d'énergie, de personnes ou d'information. Ainsi, la vue informationnelle peut représenter soit le modèle de messages échangés (Figure 22) à travers un diagramme de classe, soit les messages échangés entre les différents acteurs à travers un diagramme d'activité (Figure 19).

La quatrième et dernière vue dresse la liste des ressources utilisées au sein de l'entreprise lors des diverses activités qui ont lieu en son sein. Cette vue des ressources caractérise les moyens humains et les biens dont dispose l'entreprise pour réaliser ses processus et atteindre ses objectifs

(Figure 23). Les interactions entre les différents domaines métiers se caractérisent par un échange d'information et de données. L'approche propose de formaliser le type de données échangées entre les différents domaines métiers (Figure 22).

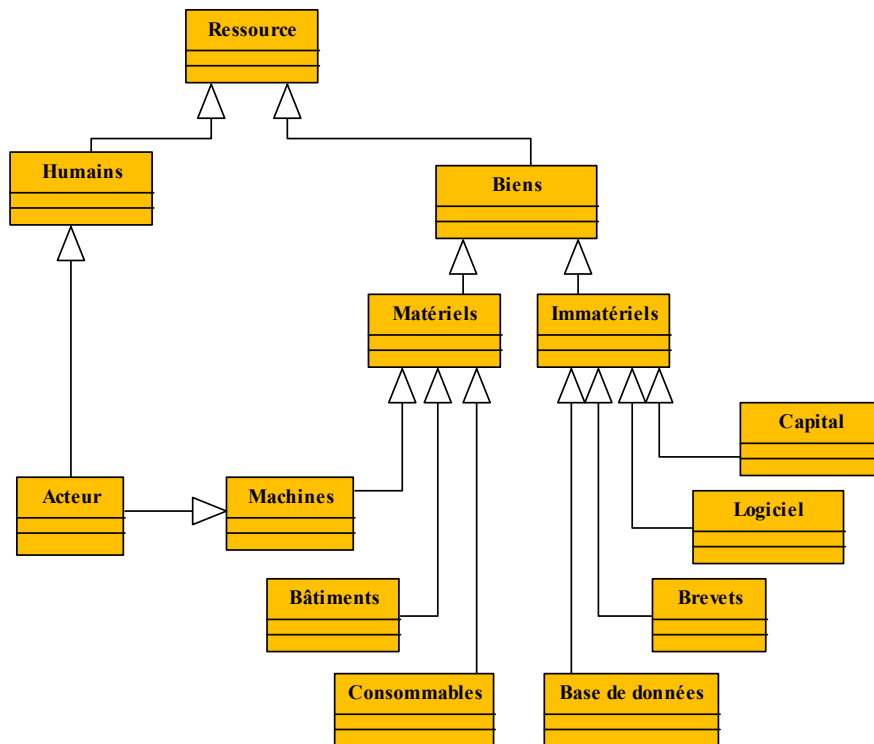


Figure 23. Vue des ressources

Les vues classiques décrites précédemment caractérisent des modèles qui regardent le système et ses constituants internes. Il est proposé ici de faire émerger la notion de vue d'interfaces qui correspond à un point de vue sur l'interaction entre le système et son environnement (au sens extérieur au système donc au sens économique, environnemental ou social). Les modèles d'interaction caractérisés par ce point de vue utilisent et relient des éléments des modèles de l'environnement et des modèles du système (quelle que soit la vue interne).

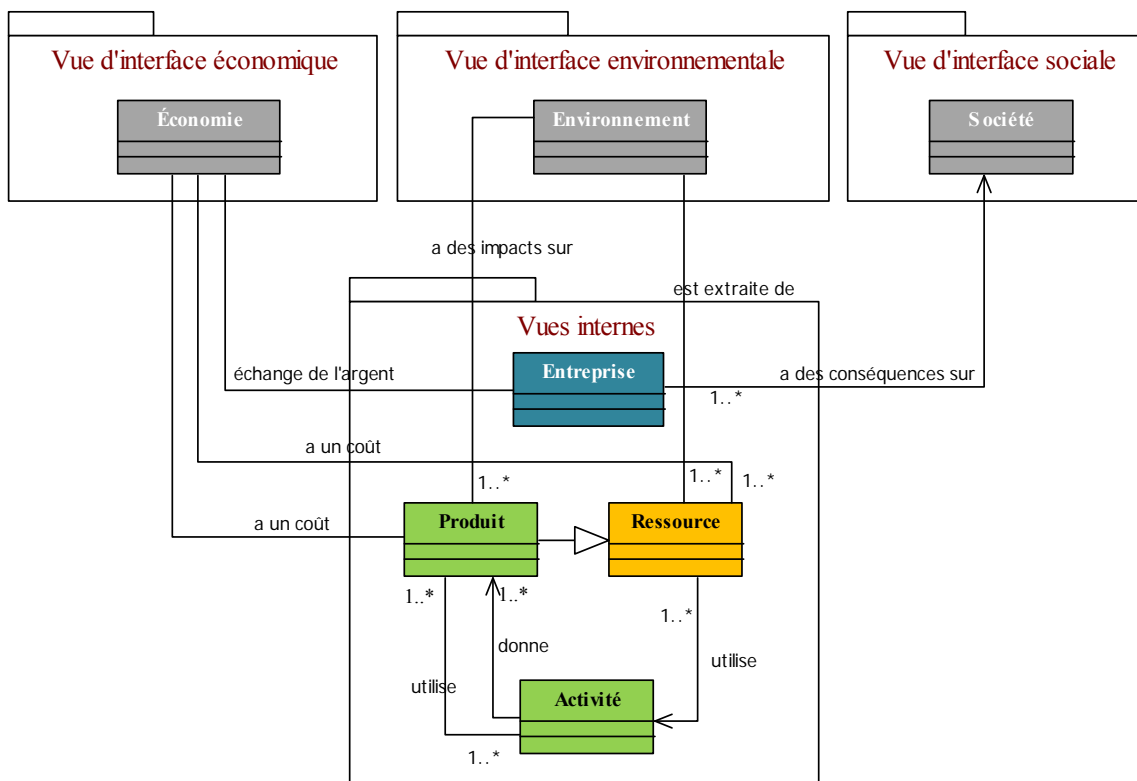


Figure 24. Vues d'interface (ajouter les limites de l'environnement et du système)

Cette formalisation des points de vue va permettre de différencier les modèles d'évaluation interne et les modèles d'interaction avec l'environnement (ou modèle d'évaluation externe).

Après avoir caractérisé les modèles du système P²E étudié par l'approche, il est nécessaire de présenter les caractéristiques des modèles d'évaluation qui rendent compte non seulement de l'état interne du système mais aussi des interactions entre le système et son environnement extérieur.

6.4.2 Modèles d'évaluation

L'évaluation est un processus qui consiste à donner une valeur à des critères pertinents qui qualifient un système. L'évaluation de la durabilité d'un système passe par la considération de critères d'évaluation internes et d'interaction. Les premiers reposent sur les modèles internes et les seconds sur les modèles d'interaction. Cette section propose de caractériser les modèles d'évaluation internes et les modèles d'interaction. Ils sont présentés selon les trois volets de la durabilité (l'environnement, l'économie et le social) et selon le volet technique. Ils convertissent des données d'inventaire en indicateurs. L'agrégation des indicateurs relève de l'évaluation multi-

critère et se trouve traitée dans la section 6.4.3. L'approche P²E impose une évaluation de la pertinence de l'étude. Cette évaluation transversale est intégrée à l'évaluation de la durabilité en tant que cinquième volet.

6.4.2.1 Évaluation environnementale

L'évaluation environnementale repose sur des modèles d'interaction entre le système et l'environnement (au sens écologique). L'objectif de l'évaluation environnementale quelle que soit sa nature réside dans la détermination des impacts d'un système sur son environnement. Le modèle d'interaction système-environnement est le suivant : chaque flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système provoque des effets ou impacts caractérisés par des modèles d'interaction. Ces modèles sont par exemple le forçage radiatif pour l'impact sur le réchauffement climatique. Ce dernier exprime le pouvoir d'émission de radiations infrarouges que possèdent les gaz à effet de serre sur une période donnée. Chaque modèle d'interaction permet de quantifier l'effet environnemental d'un flux et de l'exprimer dans une unité de référence commune pour donner lieu à un facteur d'impact qui sera utilisé pour évaluer l'impact d'un système sur l'environnement (Équation 1).

$$SI_{x,p,c} = \varphi_{x,p} \times FI_{x,c}$$

Équation 1. Calcul d'impact (Jolliet *et al.*, 2010)

$SI_{x,p,c}$ est le score d'impact sur la catégorie c de la substance x liée au processus p , $\varphi_{x,p}$ est la quantité par unité fonctionnelle de substance x (matière ou énergie) liée processus p et $FI_{x,c}$ est le facteur d'impact de la substance x sur la catégorie c .

Le modèle d'interaction système-environnement puise des éléments de la vue fonctionnelle : les processus et les flux connexes. Le modèle d'interactions environnementales est générique et peut s'appliquer à tout système. L'approche P²E étant guidée par la pensée cycle de vie, toutes les phases du cycle de vie et tous les processus opérationnels qui ont lieu sont évalués lors de l'application de l'approche.

6.4.2.2 Évaluation économique

L'évaluation économique vise à déterminer les conséquences économiques ainsi que l'état financier de la vie d'un système sociotechnique. Elle se trouve liée aux ressources, aux moyens humains et aux informations pour lesquels un coût existe. Elle fait donc appel à des éléments de

modèles d'économie et de modèles issus des vues organisationnelle, fonctionnelle et des ressources (Figures 21 et 24). L'évaluation économique va se trouver liée au modèle d'entreprise et au modèle de produit.

Le modèle d'évaluation économique d'interaction est calqué sur le modèle d'interaction environnementale et s'appuie donc sur l'équation 1. Le facteur d'impact correspond au coût unitaire et la catégorie d'impact est le coût par unité fonctionnelle. Ainsi, le modèle d'évaluation économique d'interaction s'applique uniquement au système « produit ». Il est générique.

Le modèle d'évaluation économique interne va caractériser l'état financier du système sociotechnique. Il correspond au modèle utilisé dans l'évaluation économique de l'entreprise. Par conséquent, il s'applique au système « entreprise ». L'évaluation économique de l'entreprise utilise un modèle macroscopique de l'entreprise et inclut une partie des coûts du cycle de vie du produit mais ne considère pas les coûts pour le consommateur. Cependant, il inclut une vision multiproduits et multiprojets. Il est générique. La complémentarité des deux modèles d'évaluation paraît évidente. L'évaluation économique interne de l'entreprise se situe à un niveau projet qui caractérise l'approche entreprise et complète l'approche produit et l'approche procédé. Elle consiste à déterminer la rentabilité économique d'un projet quels que soient sa nature et son degré d'élaboration. Elle permet notamment aux décideurs de savoir si un projet générera des bénéfices ou de sélectionner celui qui en générera le plus parmi un ensemble de projets. Les indicateurs les plus couramment utilisés pour étudier la rentabilité économique sont :

- ✓ le bénéfice actualisé (BACT) qui est le revenu supplémentaire que le projet est susceptible d'apporter en plus de la rémunération minimum du capital fixé arbitrairement au taux i ;
- ✓ le temps de retour sur investissement (TRI) défini comme la date k à laquelle la somme des marges brutes d'autofinancement (MBA) permet de récupérer l'investissement initial ;
- ✓ le taux de rentabilité interne (i_r) qui correspond au taux d'actualisation qui permet d'annuler le BACT sur la durée de vie de l'exploitation.

Ces trois indicateurs caractérisent le modèle générique d'évaluation économique interne. Ils sont calculés à partir de données économiques récoltées lors de l'étape d'inventaire. Les données économiques brutes nécessaires sont les investissements, les fonds de roulement, les emprunts, les recettes et dépenses d'exploitation, les amortissements, les impôts et les bénéfices nets. Le détail de la description des indicateurs est fourni en annexe 4.

Ce modèle d'évaluation interne s'applique essentiellement au système « entreprise » et aux différents projets qu'elle peut envisager. Il convient de rappeler que les processus projet s'appliquent au sous-système de pilotage.

6.4.2.3 Évaluation sociale

L'évaluation sociale est réalisée à partir des modèles de société. La complexité de l'évaluation sociale réside d'une part dans le nombre et la qualité de données et d'indicateurs et d'autre part dans la nature même des données. En effet, il s'agit du volet de l'évaluation qui repose sur des données qualitatives, semi-quantitative et quantitatives. Le modèle social en tant que tel traduit en indicateurs les différentes données factuelles relatives aux aspects sociaux du système « entreprise ». Bien qu'il soit traité dans l'AsCV considéré comme une approche orienté produit, il ne peut cependant être rapporté au produit et à l'unité fonctionnelle qui le caractérise. L'explication se trouve en partie dans les données qualitatives et semi-qualitatives qui ne peuvent être réduites à l'unité fonctionnelle. Ces données sont issues en général du modèle d'entreprise et de ses caractéristiques. Le modèle social puise des données dans les modèles de l'entreprise issus des vues des ressources, organisationnelle et informationnelle. Une très grande quantité d'indicateurs caractérise les conséquences sociales d'un système sociotechnique. Il n'existe donc pas de modèle social unique, mais une infinité de modèles sociaux dépendant du contexte et des objectifs fixés lors de la première étape de l'approche P²E. En revanche, le modèle de conversion des données qualitatives en données semi-quantitatives est générique. Il est présenté dans la figure 25. Selon les données qualitatives initiales, le modèle de conversion va être différent. Les données vont être soit à choix multiples, soit un champ à renseigner. Les premières peuvent être converties en une échelle de valeur, chaque choix correspondant à une position donnée sur l'échelle. Pour des données binaires (choix de deux alternatives ou réponse oui/non), les valeurs sont 0 ou 1. Les secondes sont converties en données binaires en fonction de la présence ou non d'une réponse. À l'inverse, il est également possible de convertir des données quantitatives en données semi-quantitatives voire qualitatives, notamment pour rendre compte d'effet de seuil. Finalement, des pourcentages (données quantitatives) peuvent être convertis en une échelle dont chaque valeur entière correspond à un intervalle de valeurs.

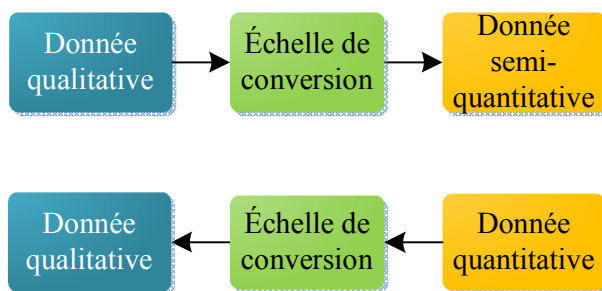


Figure 25. Conversion des données

La conversion des données d'inventaire constitue l'étape préliminaire de caractérisation des impacts qui permet ensuite de les agréger en un indicateur.

6.4.2.4 Évaluation technique

Le volet technique de l'approche P²E s'appuie sur un modèle d'évaluation technique qui rend compte du rendement du système dans son ensemble ou du procédé. L'indicateur de caractérisation du rendement correspond au ratio de la quantité réelle de produit à la sortie du processus sur la quantité maximale théorique de produit.

6.4.2.5 Évaluation de la pertinence de l'étude

Outre l'évaluation du système et de ses conséquences sur l'environnement, l'approche P²E propose un modèle d'évaluation de la pertinence de l'étude elle-même. Le modèle d'évaluation de la pertinence de l'étude repose d'une part sur un modèle de la qualité des données et d'autre part sur les pourcentages d'erreur dans les bilans matière et énergie des modèles de procédés.

6.4.3 Intégration des modèles

6.4.3.1 Intégration

Caractérisés par des vues internes, des niveaux d'instanciation et des phases du cycle de vie, chaque modèle d'une partie d'une entreprise permet de la décrire en fonction de différents objectifs. La somme de tous ces modèles constitue le modèle de l'entreprise (Ulmer, 2011). L'idéal serait de lier tous ces modèles pour qu'une modification d'un paramètre de l'un soit répercutée dans tous les autres modèles. Cependant, lier tous ces modèles générés et utilisés par différents acteurs de l'entreprise, pose des problèmes d'interopérabilité des modèles évoqués dans la sous-section 3.1.2.2. Bigand *et al.* reprennent trois approches pour faciliter l'interopérabilité :

- ✓ l'approche intégrée qui consiste à établir un modèle unique de l'entreprise issu d'une architecture de référence et à partir duquel les autres modèles seraient établis ;
- ✓ l'approche unifiée qui extrait les concepts et relations de tous les modèles de l'entreprise et les exprime dans un formalisme neutre. Chaque modèle de l'entreprise conserve néanmoins son formalisme ;
- ✓ l'approche fédérée qui relie les modèles au niveau sémantique (Bigand *et al.*, 2007).

La présente approche prétend s'appuyer sur un modèle d'évaluation fédérée car les modèles de l'entreprise, (dont font partie le modèle de produit et le modèle de procédé) sont intégrés au niveau sémantique via la définition d'une première ontologie (sous-chapitre 6.5).

6.4.3.2 Évaluation multicritère

Tous les modèles d'évaluation aboutissent à des indicateurs dont les vérificateurs sont assimilés aux données d'inventaire. Sachant que toute évaluation s'inscrit plus ou moins directement dans un processus d'aide à la décision, les indicateurs vont caractériser les critères établis selon certains principes qui vont guider la décision.

Les méthodes d'évaluation qui constituent l'approche P²E sont orientées procédé, produit ou entreprise mais peuvent concerner plusieurs des trois volets de la durabilité. Ainsi, ces méthodes peuvent être vues soit selon le système évalué, soit selon son environnement extérieur. Cette imbrication ressort particulièrement dans la figure 24.

Dans le cadre de l'approche P²E, le concept d'« impact » est synonyme d'effet. Or dans un but d'harmonisation des méthodes d'évaluation, le terme impact sera utilisé pour caractériser les effets d'un système sur son environnement extérieur. En référence à l'AMC présentée dans la section 2.2.2 et à partir de l'AeCV, un modèle générique de caractérisation de l'agrégation des données d'inventaire en données caractérisant les principes de la durabilité est proposé.

Par vérificateur sont considérés toutes les données d'inventaire, c'est-à-dire des données directement observables et mesurables (flux de matière, d'énergie et d'information). Ces vérificateurs sont ensuite agrégés en indicateurs également appelés « impacts intermédiaires » répartis dans des catégories intermédiaires (quel que soit le volet de l'analyse, c'est-à-dire quelle que soit la vue d'interface). L'agrégation de ces impacts intermédiaires a lieu dans des catégories d'impacts final ou de dommage, un dommage correspondant à un critère (quel que soit le volet de l'analyse, c'est-

à-dire quelle que soit la vue d'interface). Finalement, les critères obtenus sont agrégés en une valeur par principe de la durabilité.

Le concept de critère est généralisé ici car, comme discuté dans la section 2.3.3, selon le niveau d'agrégation, un critère au sens strict peut se retrouver l'indicateur d'un critère de niveau plus élevé. Sur le plan informationnel, une telle relativité est d'autant plus vraie qu'un critère, un indicateur, un vérificateur ou un principe correspondent tous à une donnée qui peut être convertie ou agrégée avec d'autres. Ainsi, il sera davantage question d'un critère de niveau n (Figure 26), de type quantitatif, semi-quantitatif ou qualitatif. Il sera caractérisé par un facteur de caractérisation de niveau n (qui permet de transformer des critères de niveau $n-1$ en critères de niveau n) ou par une échelle de conversion d'un type à l'autre et d'un niveau à l'autre. Selon le contexte et le niveau, le facteur de caractérisation sera un facteur d'impact, de dommage, de pondération, de caractérisation, de normalisation ou de conversion. Les niveaux de critère et les synonymes utilisés selon le domaine se retrouvent dans la figure 19.

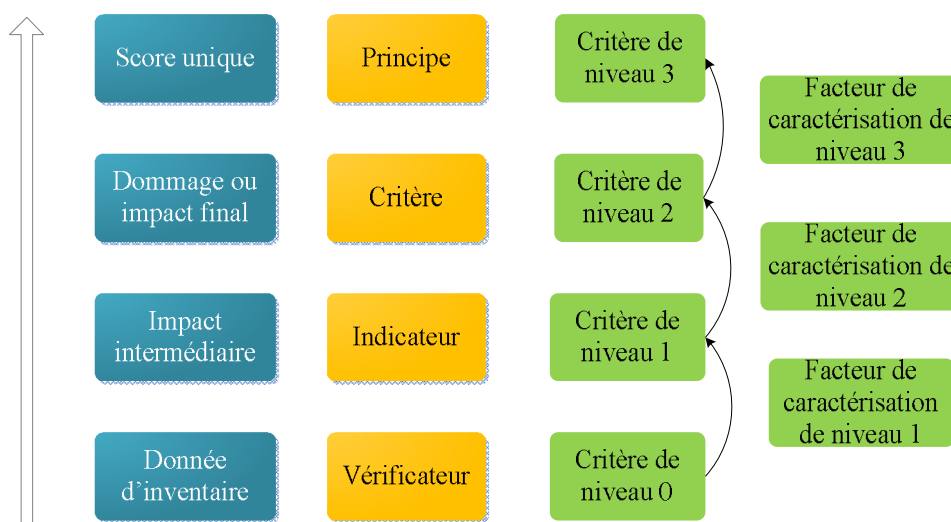


Figure 26. Transformation des critères

Dans la suite du manuscrit, les critères de niveau pourront être nommés « critère de niveau n », soit par un terme ou une expression usitée dans un contexte donné. Il convient d'insister sur le terme critère qui peut présenter une ambiguïté. S'il est employé seul, il correspondra à un critère de niveau 2 ou un dommage ou un impact final. Sinon, il sera accompagné du niveau auquel il se situe.

6.5 Ontologie

L'approche P²E se situant au niveau générique du cube GERAM (Figure 16), sa formalisation ultime passe par la définition d'une ontologie de l'approche P²E. L'intérêt de l'ontologie réside dans la formalisation et la capitalisation des connaissances d'un domaine en vue de leur échange et leur utilisation par différents experts métier (Perry, 2007). La définition d'une ontologie de l'approche a pour but de fédérer les trois systèmes et leurs modèles respectifs. Définir une ontologie consiste à décrire des classes et leurs relations (Gruber, 1995).

L'approche d'évaluation de la durabilité guidée par la pensée cycle de vie et les définitions des concepts utilisés dans les normes ISO 14040 et ISO 14044 serviront de base. La définition des concepts issus du domaine de l'ingénierie système sera en grande partie inspirée de l'ouvrage de référence de Ménadier (2003). Les concepts qui ont trait à la modélisation d'entreprise sont inspirés de la norme ISO 15047. Les réseaux de classes sont représentés à l'aide du logiciel dédié Protégé.

6.5.1 Classes

Les classes de concepts utilisés dans l'approche correspondent en partie à celles que partagent les modèles d'entreprise, de produit et de procédé. Les classes principales sont présentées à travers leur définition. Cette première ontologie reprend certains éléments présentés dans les sous-chapitres précédents du chapitre 6 qui caractérisent la structure globale de l'approche P²E. En effet, par leur généralité, les concepts et objets présentés dans les sous-chapitres précédents revêtent un caractère ontologique. Néanmoins, pour éviter les répétitions qui alourdiraient le texte, certains éléments ne sont pas présentés dans l'ontologie.

✓ Environnement

La définition d'environnement est simplifiée et tirée des différentes définitions rencontrées. Ainsi, l'environnement correspond à tout ce qui est extérieur au système. Le concept d'environnement est ambigu car dans le contexte de l'ingénierie système, il s'agit de l'environnement extérieur (société, nature ou économie), dans un autre contexte, il correspond à la nature (ou écosystème) Ainsi, en cas d'ambiguïté, le terme environnement est accompagné d'extérieur ou d'un autre qualificatif selon le contexte.

✓ Donnée

Une donnée correspond à la description d'une réalité. Elle peut être quantitative, semi-quantitative ou qualitative.

- ✓ Information

L'information correspond aux données significatives.

- ✓ Matière

La matière est une substance composée d'atomes.

- ✓ Processus

Le concept de processus est défini comme un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie.

- ✓ Système

Un système est un ensemble d'éléments corrélés et organisés en fonction d'un objectif.

- ✓ Ressource

Une ressource est un élément de matière, d'énergie, humains et d'information utilisé au cours des processus qui ont lieu dans les différents systèmes de l'entreprise.

- ✓ Énergie

L'énergie est une grandeur caractérisant un système physique. Elle est échangée entre les systèmes physiques au cours des processus.

- ✓ Évènement

Un évènement correspond à tout ce qui est capable de modifier la structure interne d'un système.

- ✓ Décision

Une décision correspond à un acte par lequel une solution est choisie.

- ✓ Choix

Un choix est un ensemble de solutions possibles.

- ✓ Flux

Un flux correspond à une quantité d'éléments sur une durée donnée.

- ✓ Impact

Un impact est un effet de quelque chose sur l'état d'une autre chose.

6.5.2 Relations

Les relations entre les classes définies dans la section précédentes sont trop nombreuses pour être décrites. Ainsi, les principales relations sont présentées ci-dessous :

- ✓ L'environnement échange de la matière et de l'énergie avec le système.
- ✓ Un système est composé de matière, d'énergie et de processus.
- ✓ Un processus transforme de la matière et de l'énergie. Un processus peut avoir pour intrant des systèmes. Le produit d'un processus peut devenir la ressource d'un autre.
- ✓ Un système et son environnement sont deux entités disjointes.
- ✓ Un évènement déclenche un processus.

Les classes peuvent également être liées par des relations génériques, à savoir des relations d'union, d'intersection, de complément, de disjonction, de restriction, de composition, de dépendance, etc.

La figure 27 montre la complexité des relations entre les classes principales de l'ontologie proposée ici.

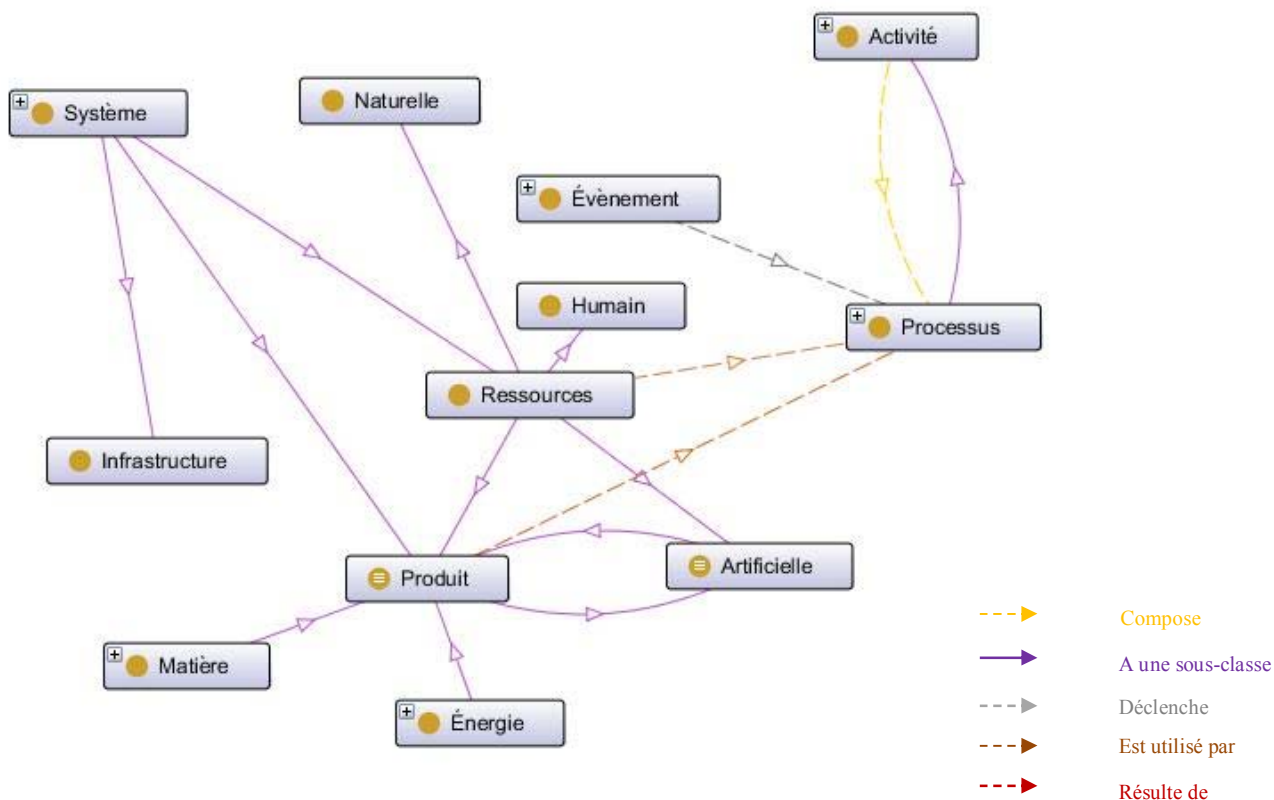


Figure 27. Classes et relations entre les classes

6.5.3 Instances

✓ Processus

Les instances de processus sont nombreuses. Dans le cas de l'approche P²E, les processus d'entreprise sont définis. Ils correspondent aux processus globaux qui opèrent au sein des différents sous-systèmes de l'entreprise. Ils sont décrits dans la section 3.1.3.2. Parmi ces processus d'entreprise, les processus opérationnels figurent parmi les plus essentiels dans l'approche P²E. Ils offrent directement un produit qui va servir à satisfaire le besoin du client. Les processus d'évaluation vont correspondre aux processus transversaux par lesquels une valeur va être donnée à l'état d'un système. Ils constituent une partie des processus de l'approche P²E. Les processus de

décision sont des processus transversaux et qui incombent aux responsables d'un système ou d'un processus.

✓ Systèmes

L'entreprise constitue un système dont les éléments sont des ressources, des processus, des produits. Un produit et une ressource peuvent également être vus comme des systèmes.

✓ Ressources

Les ressources humaines correspondent à des compétences incarnées dans une personne. Leur caractéristique essentielle d'un point de vue économique et environnemental est la quantité d'heures travaillées au sein de l'entreprise. D'un point de vue social, les conditions de travail vont constituer les caractéristiques importantes liées aux ressources humaines

Les infrastructures sont des systèmes matériels dont la durée de vie est supérieure à 3 ans. D'un point de vue environnemental, leur durée de vie matérielle correspond à la durée d'amortissement environnemental (amortissement des impacts environnementaux liés à son cycle de vie). D'un point de vue économique, la durée d'amortissement est dissociée de la durée de vie réelle. Les infrastructures incluent les bâtiments, les machines et tout intrant matériel satisfaisant la définition présente.

✓ Produits

Un produit est défini comme le résultat d'un processus. Il s'agit également d'une ressource artificielle issue de la technosphère. Il s'oppose à une ressource naturelle.

✓ Ressources

Les ressources naturelles sont directement extraites de la nature par opposition aux produits issus de la technosphère.

Les ressources informatiques correspondent aux logiciels métiers sur lesquels s'appuie l'approche. Ces ressources informatiques vont elles-mêmes invoquer les bases de données et s'appuyer sur des modèles des systèmes qu'elles étudient.

✓ Données

Les données sont une ressource virtuelle constituée de données quantitatives, semi-quantitatives et qualitatives. Les bases de données utilisées dans le cas de l'évaluation de la durabilité vont être des bases de données de facteurs d'impacts pour l'analyse de cycle de vie, des bases de données de modèles thermodynamiques pour les modèles de procédés. Selon leur origine et leur niveau de précision, les données sont classées en catégories :

- ✓ les données brutes ou données expérimentales qui sont récoltées à partir de campagne d'échantillonnage ou de mesure. Elles caractérisent la réalité d'un système ;
- ✓ les données issues de bases de données permettent de compléter les données expérimentales ;
- ✓ Les données d'experts sont les données que fournissent les différents acteurs décrits dans le sous-chapitre 7.1. Elles proviennent de leur expérience ;
- ✓ les données de simulation correspondent aux données qui résultent de la simulation du procédé. Dans l'approche P²E, elles sont exprimées de manière à être utilisées ;
- ✓ les données calculées sont des données issues de deux ou plusieurs données quantitatives à l'aide d'opérations de transformation ;
- ✓ les données d'entrée sont des données directement reliées au système modélisé. Elles s'opposent aux données issues de bases de données.
- ✓ un paramètre est une donnée quantitative qui fixe l'état d'un système. La notion de paramètre est disjointe de la notion de variable. Néanmoins, selon le contexte, un paramètre peut devenir variable et réciproquement. Les facteurs d'impacts, de pondération, de dommages sont des paramètres ;
- ✓ un critère est une donnée de référence qui caractérise quelque chose ; les synonymes des critères selon leur niveau sont décrits dans la figure 26.

L'ontologie présentée ici est complétée par un glossaire placé après les références bibliographiques. Une représentation plus complète de l'ontologie est présentée en annexe 3. Il s'agit de son état à la fin de l'écriture de ce manuscrit.

6.6 Conclusion

L'approche repose sur une structure globale générique. Elle permet à des décideurs d'intégrer des considérations de durabilité dans des choix de conception préliminaire ou détaillée. L'ingénieur de la durabilité des systèmes coordonne le dialogue entre les experts métiers et les décideurs. La difficulté est double : (i) modéliser le système qu'il pilote et notamment les interactions entre les processus des couches stratégiques, tactiques et techniques ; (ii) modéliser l'interaction entre le système et son environnement. Or la complication apparaît rapidement car les interactions entre le système et son environnement ont lieu à tous les niveaux. Les modèles internes et les modèles d'interaction doivent être interopérables. Le problème réside dans le fait que les modèles d'interaction entre les modèles puisent des éléments de plusieurs modèles (issus des différentes vues du système). En outre, certains éléments identiques seront définis de manière différente selon les modèles. L'approche P²E propose de puiser des éléments dans les modèles de produits d'un système, dans la modélisation des procédés et dans la modélisation de l'entreprise pour construire un modèle interne et le relier à un modèle d'environnement (au sens économique, social et écologique) à travers des modèles d'interaction.

Derrière l'unification partielle des modèles de procédé, de produit et d'entreprise se dissimule le métamodèle d'UML 2.0. L'ontologie proposée reste une première approche mais constitue une voie vers une intégration technique et informatique (*XML (Extensible Markup Language)*, *OWL (Web Ontology Language)*) de modèles de procédé, de produit et d'entreprise.

Chapitre 7. Caractérisation partielle

Les systèmes d'entreprise agro-industriels constituent des systèmes remarquables en ce qu'ils font nécessairement appel à un système agricole. C'est pourquoi il semble pertinent de décrire l'approche partielle P²E appliquée à ce domaine en tant qu'instance de l'approche P²E générique. Dans ce chapitre, les caractéristiques de l'approche partielle P²E appliquée aux systèmes agro-industriels sont présentées.

7.1 Systèmes agro-industriels

Les systèmes agro-industriels sont composés de deux types d'entreprises, l'un à vocation agricole, l'autre à vocation industrielle. Cette distinction repose sur la production de matière biologique brute par le système agricole et par sa transformation par le système industriel. Dans le cas de l'approche P²E, le système global est constitué des deux systèmes « entreprise » susmentionnés, d'un système « produit » et un système « procédé » (Figure 28). Le système « produit » est quant à lui divisé en deux sous-systèmes « produit » : l'un correspondant à la matière biologique brute cultivée et récoltée en champ, l'autre correspondant à la matière biologique transformée par le système industriel et les procédés connexes.

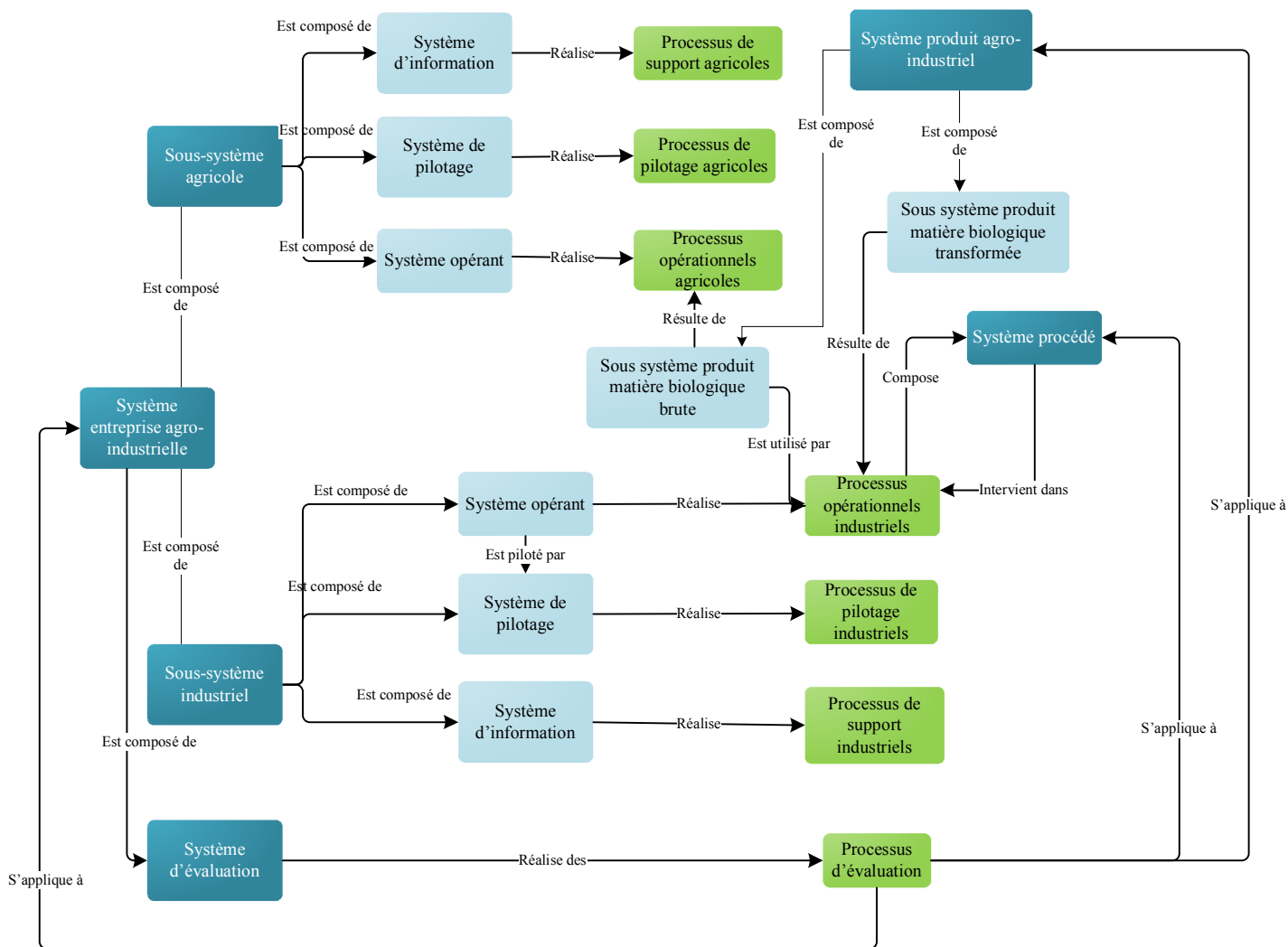


Figure 28. Structure du système d'entreprise agro-industrielle

Un tel système fait appel à un certain nombre d'acteurs responsables de différents sous-systèmes. Ainsi, il y aura l'agriculteur principal, les ouvriers agricoles pour le système agricole. Quant au système industriel, il y aura le gestionnaire (ou manager ou l'équipe de direction), le responsable des ressources humaines, le responsable logistique, l'agent comptable, le responsable hygiène et sécurité, l'ingénieur procédé et les techniciens. À ces acteurs classiques s'ajoute l'ingénieur en durabilité des systèmes et son rôle défini dans le sous-chapitre 6.3.

Le gestionnaire (ou manager ou l'équipe de direction) joue le rôle de décideur. Il est le commanditaire de l'évaluation. Pour avoir accès aux comptes de l'entreprise pour le volet économique de l'évaluation, l'acteur privilégié est le comptable (ou agence comptable ou service comptable). Il va posséder les données économiques globales, c'est-à-dire caractérisant l'entreprise ainsi que

les données spécifiques aux flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système et de ses sous-systèmes.

La modélisation des procédés est réalisée par l'ingénieur procédé. Il va permettre de prédire les rendements d'un procédé ou d'une chaîne de production à partir des modèles unitaires et thermodynamiques. Ces données vont jouer un rôle dans la demande en ressources et la quantité de produit à manufacturer. Logiquement, la quantité de travail ainsi que le coût et le prix de vente du produit vont être liés aux résultats de cette simulation. Certaines données très spécifiques et techniques à propos du procédé seront fournies par les techniciens.

La direction des ressources humaines va jouer un rôle important dans l'évaluation sociale. C'est en effet elle qui va pouvoir renseigner sur les conditions de travail au sein de l'entreprise, notamment sur le temps de travail, les salaires, les niveaux d'études, etc. Le responsable hygiène et sécurité est identifié comme le second acteur qui peut renseigner les données du volet social. C'est lui qui aura connaissance des risques au travail, des accidents enregistrés, etc. Il aura également connaissance des protocoles mis en place pour assurer la sécurité des travailleurs en cas de problèmes quels qu'ils soient.

Le responsable logistique va être responsable des transports en amont et en aval de l'entreprise. Il va ainsi posséder les informations primordiales à ce sujet.

Il faut rappeler ici que selon la taille de l'entreprise, plusieurs acteurs peuvent être en réalité incarnés en une seule personne.

7.2 Modèles d'évaluation

Les modèles d'évaluations correspondent aux modèles d'indicateurs qui caractérisent les critères économiques environnementaux et sociaux, ainsi que les modèles d'indicateurs qui caractérisent les critères techniques et les critères de pertinence de l'étude. Selon la terminologie définie dans la figure 26, les modèles d'évaluation correspondent aux modèles qui sous-tendent la transformation des critères de niveau 0 en critères de niveau 1 (soit une transformation des données d'inventaire en impacts intermédiaires ou indicateurs).

Le volet environnemental de l'approche partielle est porté par l'AeCV. Le volet économique puise ses indicateurs dans l'AcCV et dans l'évaluation économique de l'entreprise. Le volet social est évalué à partir de l'AsCV. Le volet technique ne présente pas d'impacts intermédiaires en tant que tels mais des critères techniques de niveau 1 issus de la simulation du procédé. Enfin, la pertinence de l'étude est évaluée à partir des critères de niveau 1 issus de la simulation du procédé et

issus du modèle d'évaluation de l'incertitude sur les données d'entrée. Le présent sous-chapitre décrit les méthodes d'évaluation utilisées pour l'évaluation de la durabilité et de la pertinence de l'étude. Les indicateurs issus des différentes méthodes d'évaluation choisies pour chacun des volets proviennent soit de l'approche procédé, soit de l'approche produit, soit de l'approche entreprise.

Les indicateurs de l'approche P²E pour la durabilité peuvent donc être présentés soit selon les systèmes étudiés, soit selon les volets de la durabilité et l'ingénierie. Les sections suivantes présentent les méthodes d'évaluation et le choix des indicateurs pertinents pour l'agro-industrie selon les systèmes procédé, produit et entreprise. Ce choix est motivé par la présence d'indicateurs des différents volets issus des modèles d'évaluation appliqués aux différents systèmes. Ce sous-chapitre se termine par la présentation du modèle d'évaluation de l'incertitude des données d'entrée qui est transversal au trois approches.

7.2.1 Évaluation orientée procédé

L'évaluation orientée procédé repose sur le calcul d'indicateurs relatifs à la simulation du procédé. S'appuyant sur un bilan matière et un bilan enthalpie, la simulation du procédé permet de simuler le comportement d'un procédé et d'en calculer un rendement global correspondant à un premier indicateur. Les écarts relatifs entre la quantité de matière et d'enthalpie entrantes et sortantes constituent les deux autres indicateurs qui émanent de la simulation du procédé. Cependant, ils ne caractérisent pas l'efficacité du procédé, mais la pertinence de l'étude.

7.2.2 Évaluation orientée produit

L'évaluation orientée produit est réalisée par l'application des méthodes d'AeCV et d'AcCV. Bien que basée sur la méthode d'ACV, l'AsCV est considérée ici comme une méthode d'évaluation orientée entreprise plutôt que produit, en particulier à cause de l'impossibilité d'exprimer les résultats d'impacts sociaux par unité fonctionnelle, caractéristique fondamentale de l'approche produit. En effet, diviser les pourcentages par la quantité d'unité fonctionnelle paraît difficilement interprétable. Par son exhaustivité, l'AeCV a été retenue comme méthode d'évaluation des impacts environnementaux notamment parce qu'elle propose de déterminer des catégories d'impacts qui balayent l'ensemble des problématiques environnementales à une échelle locale, régionale ou globale. Quant à l'AcCV, elle a été sélectionnée pour rendre compte de coûts du cycle de vie du projet qui n'incombent pas à l'entreprise.

Le modèle d'impacts sur l'environnement retenu est un modèle basé sur des effets physico-chimiques et biologiques (catégories intermédiaires d'impacts) et sur des éléments à protéger contre la variation des effets physico-chimiques et biologiques (catégories finales d'impacts ou catégorie de dommage) (section 2.3.3). Le modèle de coût correspond au modèle générique (sous-section 6.4.2.2). Parmi les indicateurs environnementaux qui existent, ceux proposés par (Hauschild *et al.*, 2012) ont été retenus pour caractériser les impacts environnementaux du système. Le choix d'une telle méthode est justifié par les arguments avancés par les experts en ACV pour évaluer les modèles d'évaluation environnementale. En outre, les modèles sur lesquels reposent les indicateurs de la méthode Hauschild ont déjà été appliqués et leur pertinence a été éprouvée. La description des indicateurs et celle des unités correspondantes sont proposées en annexe 11. Ils sont rassemblés dans le tableau 8 accompagnés des indicateurs techniques et des indicateurs de pertinence de l'étude, économiques et sociaux sélectionnés pour caractériser un système agro-industriel.

Tableau 8. Indicateurs sélectionnés pour caractériser la durabilité

Volet	Indicateur (ou impact intermédiaire)	Unité
Technique	Rendement du procédé	%
Pertinence de l'étude	Respect du bilan enthalpie	%
	Respect du bilan matière	%
	Incertitude moyenne sur les données d'entrée	%
Environnement	Acidification	kg H ⁺ éq
	Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq
	Déplétion des ressources abiotiques (CML 2001)	kg Sb éq
	Déplétion des ressources aquatiques	UBP
	Écotoxicité (UseTox)	CTUe
	Eutrophisation d'eau douce (ReCiPe Mid H)	kg P éq
	Eutrophisation marine (ReCiPe Mid H)	kg N éq
	Eutrophisation terrestre	kg N éq
	Formation d'oxydants photochimiques (ReCiPe Mid H)	kg NMVOC
	Occupation de terres agricoles	m ² a
	Occupation de terres urbaines	m ² a
	Particules fines/ effets respiratoires inorganiques	mg PM in
	Radiations ionisantes sur la santé humaine	kBq U-235 éq
	Radiations ionisantes sur les écosystèmes	CTUe
	Réchauffement Climatique (IPCC 100a)	kg CO ₂ -éq.
	Toxicité humaine, cancer (UseTox)	CTUh
	Toxicité humaine, hors cancer (UseTox)	CTUh
	Transformation de terres naturelles	m ²
	Société	Santé Sécurité au travail
Santé du consommateur		Sans unité
Développement de la technologie		Sans unité
Emploi local		Sans unité
Promotion de la responsabilité sociale		Sans unité
Économie	Bénéfice actualisé	€
	Temps de retour sur investissement	année
	Taux de rentabilité interne	Sans unité
	Coût par unité fonctionnelle	€

7.2.3 Évaluation orientée entreprise

L'évaluation sociale proposée ici repose sur la méthode d'AsCV. Elle fait appel à des données issues de l'inventaire. Il s'agit de données qualitatives, semi-qualitatives ou quantitatives. Ces données d'inventaire (qui sont les analogues des données de flux pour l'AeCV ou l'AcCV) ont été sélectionnées à partir d'un ensemble de plusieurs centaines de données relevées dans la littérature puis adaptés au secteur agro-industriel. Les données d'inventaire semi-quantitatives et qualitatives doivent être quantifiées pour pouvoir ensuite être agrégées sous un indicateur donné. Ce travail de conversion constitue la caractérisation des impacts. Il n'existe donc pas de facteur d'impacts sociaux intermédiaires qui seraient les équivalents des facteurs d'impacts environnementaux ou du coût unitaire mais seulement des facteurs de conversion. Des données basées sur des alternatives sont quantifiées à l'aide d'une échelle qui permet de les classer de 0 à 1 dans le cas où la valeur la plus basse n'est pas préjudiciable ou une échelle de -1 à 1 dans le cas où la valeur la plus basse est préjudiciable. Par exemple, l'indicateur « estimation de la qualité et nombre d'informations disponibles concernant les propriétés nutritives et organoleptiques du produit » prend la valeur « insuffisant », « suffisant » ou « plus que suffisant ». Comme il pourrait être préjudiciable pour le consommateur de ne pas avoir accès à toutes ces informations, la quantification des valeurs donne -1 pour « insuffisant », 0 pour « suffisant » et 1 pour « plus que suffisant ». Cette quantification s'inspire de la méthodologie développée par Hsu *et al.* (2013). Elle est également utilisée pour les indicateurs binaires avec l'équivalence suivante : 0 ou -1 pour « non » et 1 pour « oui ». Quand l'indicateur correspond à un pourcentage, il reçoit un score par intervalle. Par exemple, si le pourcentage de travailleurs locaux est compris entre 0 % et 50 %, le score est égal à 0, si ce pourcentage est compris entre 50 % et 100 %, le score est de 1. Le nombre d'intervalles dépend des objectifs fixés au début de l'étude et de l'indicateur considéré. Cette notation des pourcentages est inspirée de la méthode développée par Foolmaun et Ramjeeawon (2013). Ces deux méthodes pré-supposent d'organiser les données de sorte que l'alternative la plus positive, eu égard à la société, reçoive le score le plus élevé. Dans le présent travail, les données d'inventaire sélectionnées sont agrégées en des indicateurs qui caractérisent des sous-catégories (analogues aux catégories intermédiaires). Ces indicateurs sont tirés du guide de l'UNEP sur l'AsCV (UNEP, 2009). Ensuite, le parti a été pris d'agréger les indicateurs en critères caractérisant les parties prenantes plutôt que les principes (section 2.3.5) afin de mettre en exergue les dommages sur des sujets à protéger (bien que les soient inextricablement liés). Le tableau 9 rassemble les facteurs de conversion utilisés pour convertir puis agréger les données sociales de l'inventaire en impacts intermédiaires.

Tableau 9. Facteurs de conversion des données sociales d'inventaire en impacts intermédiaires

Sous-catégories d'impact (impacts intermédiaires)	Indicateurs d'inventaire	Valeur d'impact intermédiaire	Source
Santé Sécurité au travail	Nombre d'accident fatal par an	1 si le nombre d'accident est 0, -1, s'il est ≥ 1	Hsu <i>et al.</i> 2013
	Mesure de prévention des risques du travail	-1 si non, 1 si oui	Hsu <i>et al.</i> 2013
	Protocole d'urgence en cas de blessures ou d'accident	-1 si non, 1 si oui	Hsu <i>et al.</i> 2013
	Protocole d'urgence en cas d'exposition à des produits chimiques dangereux (pesticides)	-1 si non, 1 si oui	Hsu <i>et al.</i> 2013
	Présence et utilisation d'équipement de protection dans les situations qui le nécessitent	-1 si non, 1 si oui	Hsu <i>et al.</i> 2013
	Nombre d'emplois temps plein	1 si >0 , 0 sinon	
Développement de la technologie	Efforts réalisés par le secteur dans le développement des technologies ?	0 si non, 1 si oui	Hsu <i>et al.</i> 2013
	Contribution à l'économie locale	1 si impôts payés, 0 sinon	
Santé du consommateur	Nombre de plaintes ou de mécontentements concernant le produit vendu	1 si = 0 et -1 si ≥ 1	Hsu <i>et al.</i> 2013
	Estimation de la qualité et nombre d'informations disponibles concernant les propriétés nutritives et organoleptiques du produit	0 si insuffisant, 0,5 si suffisant, 1 si plus que suffisant	Hsu <i>et al.</i> 2013
Emploi local	Pourcentage de travailleurs locaux	0 entre 0 % et 20 %, 1 entre 20 % et 40 %, 2 entre 40 % et 60 %, 3 entre 60 % et 80 %, 4 entre 80 % et 100 %	Foolmaun et Ramjeeawon 2013
	Employés avec un haut niveau d'étude	0 entre 0 % et 20 %, 1 entre 20 % et 40 %, 2 entre 40 % et 60 %, 3 entre 60 % et 80 %, 4 entre 80 % et 100 %	Foolmaun et Ramjeeawon 2013
	Employés avec un niveau d'étude de base	0 entre 0 % et 20 %, 1 entre 20 % et 40 %, 2 entre 40 % et 60 %, 3 entre 60 % et 80 %, 4 entre 80 % et 100 %	Foolmaun et Ramjeeawon 2013
Promotion de la responsabilité sociale	Certifications	0 si aucune, 1 sinon.	Hsu <i>et al.</i> 2013

L'évaluation économique de l'entreprise est générique et les indicateurs qu'elle permet de calculer sont décrits dans la section 6.4.2.2. Ils sont rappelés dans le tableau 8.

7.2.4 Évaluation de l'incertitude des données

L'évaluation de l'incertitude des données d'inventaire est réalisée avec la matrice de pédigrée développée par Weidema and Wesnaes (1996) et utilisée pour les calculs d'incertitude des données d'inventaire de cycle de vie de la base de données européenne Ecoinvent. L'analyse de la qualité des données permet de prendre en compte l'incertitude liée aux données utilisées. En effet, l'approche reposant sur une très grande quantité de données, leur qualité doit être étudiée. D'après la méthodologie utilisée pour les inventaires de cycle de vie réalisés et rassemblés dans la base de données Ecoinvent, une telle analyse se divise en deux étapes successives :

- ✓ l'évaluation qualitative des différents paramètres qui détermine la qualité d'une donnée (fiabilité, exhaustivité, corrélation temporelle, corrélation géographique, corrélation technologique, et taille de l'échantillon). Pour chaque donnée utilisée dans l'étude, chacun des paramètres reçoit une note située sur une échelle de 1 à 5. Ainsi, un score de qualité est calculé pour chaque donnée en additionnant la note de chaque paramètre évalué. Plus le score est élevé, moins la qualité de la donnée est bonne. L'annexe 10 rassemble les différents paramètres de qualité et la signification des notes qui leur correspondent ;
- ✓ l'évaluation quantitative des données qui associe un facteur d'incertitude à la note qu'un paramètre peut recevoir lors de l'évaluation qualitative. Les facteurs d'incertitude permettent alors de calculer la variance $V_{95\%}$ (avec un intervalle de confiance de 95 %) via la formule statistique suivante (Frischknecht *et al.*, 2007) :

$$V_{95\%} = \exp \sqrt{\sum_{n=1}^7 \ln^2 U_n}$$

Équation 2. Variance à 95 % pour l'analyse de la qualité des données

U_1 est le facteur d'incertitude pour le paramètre de fiabilité, U_2 le facteur d'incertitude pour le paramètre d'exhaustivité, U_3 le facteur d'incertitude pour le paramètre de corrélation temporelle, U_4 le facteur d'incertitude pour le paramètre de corrélation géographique, U_5 le facteur d'incertitude pour le paramètre de corrélation technologique, U_6 le facteur d'incertitude pour le paramètre de la taille de l'échantillon et U_7 le facteur d'incertitude de base (dépendant des techniques de mesure et des modélisations des émissions).

Déterminer cette variance offre la possibilité de réaliser une simulation de Monte Carlo laquelle permet de propager les incertitudes liées à la distribution statistique des données d'entrée. Par défaut, les données utilisées dans la base de données Ecoinvent sont fournies accompagnées d'une

variance à 95 %. Chaque donnée brute récoltée et chaque donnée calculée à partir d'autres sources qu'Ecoinvent a été soumise à l'évaluation de la qualité. Ainsi, l'incertitude des résultats de l'évaluation peut être calculée en tenant compte non seulement des incertitudes liées à la base de données mais aussi des incertitudes directes liées aux données brutes.

Par ailleurs, le résultat de cette variance permet également de déterminer l'écart-type en calculant la racine carrée de ladite variance. Compte tenu des facteurs d'incertitude, cet écart type est donné pour une moyenne normalisée à 1. Ainsi, à partir de ce résultat, il est proposé de déterminer une incertitude sur chaque donnée par le calcul suivant (Équation 3) :

$$I = \frac{\sqrt{V_{95\%}} - 1}{100}$$

Équation 3. Incertitude sur les données

I est l'incertitude sur les données (en %) et $V_{95\%}$ la variance à 95 %.

L'analyse de la qualité des données mènent donc au calcul d'une incertitude moyenne sur les données d'entrée qui constitue l'un des indicateurs retenu pour évaluer la pertinence de l'étude (section 7.3.2).

7.3 Analyse multicritère pour la durabilité

Après avoir évalué les trente et un indicateurs pour l'évaluation de la durabilité d'un système agro-industriel, une analyse multicritère (AMC) est réalisée de manière à réduire le nombre de critères dont il faut tenir compte lors de la prise de décision. En effet, aucun être humain ne peut appréhender autant de critères. L'AMC est divisée ici en deux parties : une partie pour les résultats d'impacts intermédiaires environnementaux et sociaux et l'autre partie pour les résultats économiques, technique et sur la pertinence de l'étude. Cette séparation est fondée sur la nature du résultat obtenu lors de l'agrégation complète transitive (section 2.2.2). En effet, l'agrégation des indicateurs sociaux entre eux et des indicateurs environnementaux entre eux aboutit à des dommages puis à un score unique (critère de niveau 3) par volet. En revanche, les résultats économiques, techniques et de pertinence de l'étude aboutissent à des critères qualitatifs (un critère par volet). Par conséquent, l'évaluation de la durabilité est basée sur une méthode d'agrégation partielle (section 2.2.2) qui aboutit à cinq critères finals (de niveau 2 ou 3), c'est-à-dire un pour chaque volet de la durabilité, un pour le volet technique et un pour le volet de la pertinence de

l'étude. Ce choix est motivé par la volonté de ne pas considérer de compensation entre les volets sociaux, économiques, environnementaux et afin de viser une durabilité forte (Tableau 1). Les sections suivantes présentent les méthodes d'agrégation et les facteurs de pondération retenus pour l'évaluation de la durabilité de systèmes agro-industriels.

7.3.1 Volets environnemental & social

Une analyse multicritère par somme pondérée est appliquée pour le volet social et pour le volet environnemental. Elle permet de passer de plusieurs indicateurs ou critères de niveau 1 à un unique critère de niveau 3. Pour le volet environnemental, les indicateurs sont agrégés dans trois catégories d'impact final ou catégories de dommage (santé humaine, qualité des écosystèmes et ressources naturelles) par des facteurs de pondération établis appelés facteurs de dommage. Il convient de noter que tous les indicateurs sont issus de l'évaluation orientée « produit ».

Par analogie, les facteurs de pondération qui permettent de passer d'une sous-catégorie d'impact social (ou catégorie intermédiaire) à une catégorie d'impact social (catégorie de dommage) sont appelés facteurs de dommage. Chaque facteur de dommage correspond à l'inverse de la somme des notes maximales de chaque indicateur de sous-catégorie (Figure 29). Les résultats d'impacts sociaux finals (ou de dommages sociaux) sont ainsi compris entre -1 et 1 et peuvent donc être exprimés en pourcentage. Tous les indicateurs sociaux proviennent de l'évaluation orientée entreprise.

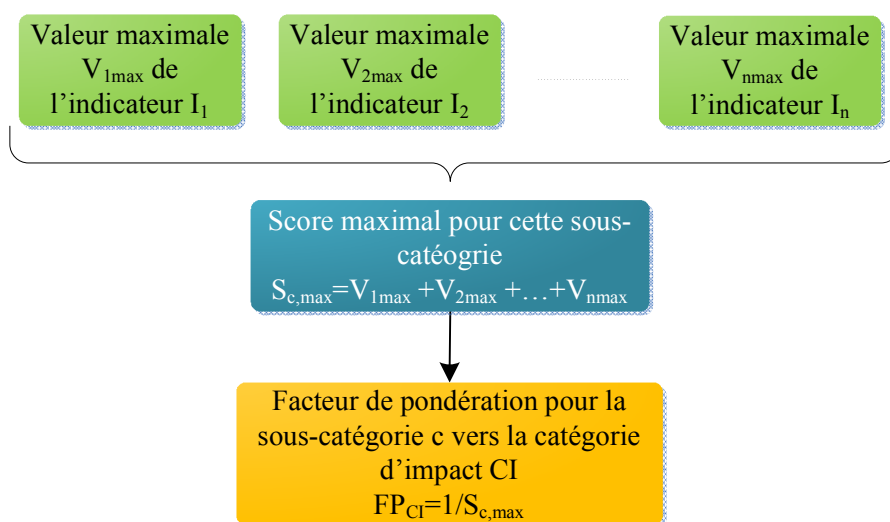


Figure 29. Calcul des facteurs de pondération sociaux (ou facteurs de dommage)

Ainsi, le premier niveau d'analyse multicritère pour les volets environnementaux et sociaux permet de diminuer de réduire les 23 indicateurs en 8 critères (3 environnementaux et 5 sociaux). Le

tableau 10 donne les facteurs de pondération (ou de caractérisation de niveau 2, ou de dommage) entre les catégories intermédiaires et les catégories de dommages.

Tableau 10. Facteurs de dommage retenus pour l'AeCV et l'AsCV

Catégories intermédiaires	Catégorie de dommage	Unité	Facteurs de dommage
Déplétion des ressources abiotiques (CML 2001)	Ressources naturelles	kgSb/kgSb	1
Acidification	Qualité des écosystèmes	species.year / kg éq H ⁺	1
Occupation de terres agricoles	Qualité des écosystèmes	species.year / m ² a	1
Réchauffement Climatique (IPCC 100a)	Santé Humaine	DALY / kg CO ₂ -éq.	0,0000014
Réchauffement Climatique (IPCC 100a)	Qualité des écosystèmes	species.year / kg CO ₂ -éq	7,93 10 ⁻⁹
Écotoxicité (UseTox)	Qualité des écosystèmes	species.year / CTUe	0
Eutrophisation terrestre	Qualité des écosystèmes	species.year / kg N éq	0
Eutrophisation d'eau douce (ReCiPe Mid H)	Qualité des écosystèmes	species.year / kg P éq	4,44 10 ⁻⁸
Toxicité humaine, cancer (UseTox)	Santé Humaine	DALY / CTUh	11,5
Toxicité humaine, hors cancer (UseTox)	Santé Humaine	DALY / CTUh	2,7
Radiations ionisantes sur les écosystèmes	Qualité des écosystèmes	species.year / CTUe	0
Radiations ionisantes sur la santé humaine	Santé Humaine	DALY / kBq U-235 éq	0,000000021
Eutrophisation marine (ReCiPe Mid H)	Qualité des écosystèmes	species.year / kg N éq	0
Transformation de terres naturelles	Qualité des écosystèmes	species.year / m ²	0
Déplétion de la couche d'ozone	Santé Humaine	DALY / kg CFC-11 éq	0,00176
Particules fines/ effets respiratoires inorganiques	Santé Humaine	DALY / mg PM in éq	1
Formation d'oxydants photochimiques (ReCiPe Mid H)	Santé Humaine	DALY / kg NMVOC	0,000000039
Déplétion des ressources aquatiques	Ressources naturelles	kgSb/UBP	0
Occupation de terres urbaines	Qualité des écosystèmes	species.year / m ² a	0
Santé Sécurité au travail	Travailleurs	Sans	0,143
Santé du consommateur	Consommateurs	Sans	0,083
Développement de la technologie	Société	Sans	0,5
Emploi local	Communauté locale	Sans	0,5
Promotion de la responsabilité sociale	Chaîne de valeur	Sans	1

Dans le but de réduire les 8 critères sociaux et environnementaux, une nouvelle somme pondérée peut être réalisée afin d'obtenir un score unique environnemental et un score unique social (critère de niveau 3). Pour le volet environnemental, chacune des trois catégories d'impact final (ou de dommage) est normalisée puis pondérée afin d'être agrégée aux deux autres pour donner un score

environnemental unique (critère de niveau 3) (Tableau 11). Quant aux dommages sociaux (critères de niveau 2), ils sont directement sommés en un score social unique (critère de niveau 3) dans la mesure où les résultats de dommages sont tous exprimés en pourcentage (donc normalisés à cent et sans unité). Aucun facteur de pondération n'est appliqué.

Tableau 11. Facteurs de normalisation et de pondération environnementaux et sociaux (Hauschild *et al.*, 2012)

Catégorie de dommage	Unité du facteur de normalisation	Facteurs de normalisation	Facteurs de pondération (sans unité)
Santé humaine	1/DALY	49,6	400
Qualité des écosystèmes	1/espèces.an	5727	400
Ressources naturelles	kgSb	0,00003731	200
Travailleurs	-	-	1
Consommateurs	-	-	1
Société	-	-	1
Communauté locale	-	-	1
Chaîne de valeur	-	-	1

7.3.2 Volets économique, technique & pertinence de l'étude

Les indicateurs économiques et techniques caractérisent la faisabilité du projet de développement d'un système. Leur valeur conditionne la réalisation ou non d'un projet. En effet, si l'évaluation économique montre que le projet n'est pas viable, même si les impacts environnementaux sont peu élevés, le projet ne démarrera probablement pas. Ainsi, les indicateurs économiques sont agrégés en un critère de niveau 2 qualitatif binaire qui prend soit la valeur « viable », soit la valeur « non viable ». Il reçoit la valeur « viable » si et seulement si les quatre indicateurs satisfont une condition particulière, à savoir le bénéfice actualisé et le temps de retour sur investissement doivent être positifs, le taux de rentabilité interne doit être supérieur au taux d'actualisation et le coût du cycle de vie doit être inférieur au prix de vente. Si l'une des quatre conditions n'est pas respectée, le projet sera considéré comme non viable.

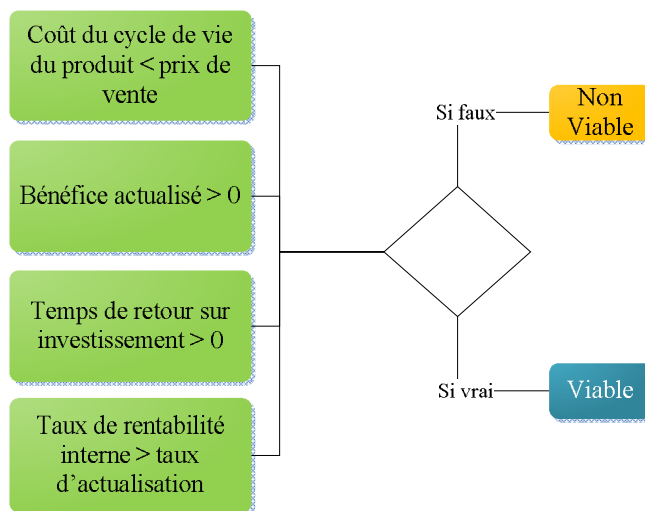


Figure 30. Calcul du critère de viabilité économique

Quant à l'indicateur technique il caractérise l'efficacité du procédé (critère de niveau 2). En fonction du rendement du procédé, l'efficacité prendra la valeur « procédé optimal » pour un rendement supérieur à l'intervalle moyen, « procédé efficace » pour un rendement compris dans l'intervalle moyen et « procédé à améliorer » pour un rendement inférieur à l'intervalle moyen. L'intervalle moyen correspond à la moyenne plus ou moins l'écart-type.

La pertinence de l'étude est un critère de niveau 2 qui rend compte de la qualité méthodologique de l'étude et de la simulation. À cet effet, elle rassemble l'indicateur de respect du bilan matière et celui de l'incertitude moyenne sur les données d'entrée. Les résultats de l'étude seront jugés pertinents si et seulement si le bilan matière est respecté avec un écart de 3% au plus et si l'incertitude moyenne sur les données n'excède pas 40 % en conception préliminaire et 30 % en conception détaillée. Si l'une des deux conditions n'est pas respectée, l'indicateur de pertinence de l'étude recevra la valeur « résultats non pertinents ».

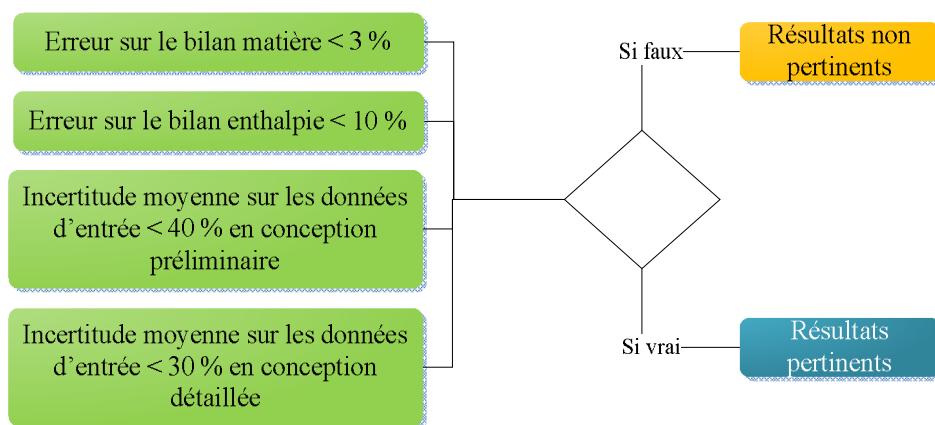


Figure 31. Calcul de la pertinence de l'étude

7.4 Conclusion

L'évaluation de la durabilité d'un système agro-industriel proposée par l'approche P²E contient l'AdCV intégrée au niveau de l'inventaire présentée dans la section 2.3.5. Elle se trouve ainsi guidée par la pensée cycle de vie. Cependant, l'approche propose une évaluation de la durabilité qui dépasse l'AdCV en la complétant par l'évaluation économique de l'entreprise ainsi que la simulation du procédé.

Avec cinq critères (trois de niveau 2 et deux de niveau 3) évalués, l'approche est partiellement intégrée en ce qu'elle n'aboutit pas à une agrégation totale qui donnerait un critère unique de niveau 4. Elle suppose donc que les volets de la durabilité ne sont pas équivalents et vise alors une durabilité forte (Tableau 1).

Les méthodes d'évaluation ont été présentées pour les trois volets de l'évaluation de la durabilité proposée, pour le volet technique et pour l'évaluation de la pertinence de l'étude. Le résultat final de l'approche proposée reposera donc sur deux critères de niveau 3 (volets social et environnemental) et trois critères de niveau 2 (volets économique et technique et pertinence de l'étude) grâce auxquels le décideur pourra analyser et comparer plusieurs scénarios d'entreprise, de procédé et de produit : l'efficacité du procédé, la pertinence de l'étude, l'impact environnemental, l'impact social et la viabilité économique.

L'évaluation économique du produit réalisée par l'application de l'AcCV présente deux manières possibles de voir les choses : soit les coûts sont considérés comme des flux donc ils interviennent lors de l'étape d'inventaire, soit ils sont considérés comme un indicateur économique d'interaction caractérisé par un facteur d'impact économique assimilé au coût unitaire. Dans le but

d'unifier les méthodes d'évaluation multicritère, le parti a été pris de considérer les coûts comme un indicateur économique.

Chapitre 8. Implémentation

L'approche P²E pour l'évaluation de la durabilité d'un système agro-industriel guidée par la pensée cycle de vie a été implémentée à travers un outil de calcul de la durabilité appelé &cOlive. La production d'huile d'olive vierge a été le cas d'étude sélectionné en relation avec le projet européen OiLCA.

8.1 Structure générale de l'outil &cOlive

L'outil &cOlive est une application Excel unique codée en *Visual Basic for Application (VBA)*. L'objectif de l'outil est de modéliser le système de production d'huile d'olive vierge et ses impacts sur l'environnement, l'économie, la société afin d'évaluer la durabilité d'un tel système. Il propose également de calculer les indicateurs techniques et de pertinence de l'étude présentés dans la section 7.2.1. La figure 32 présente la structure globale de l'outil avec un point de vue informationnel. Les objets du modèle d'information d'&cOlive sont organisés en six catégories. La feuille d'ouverture (ou de démarrage) et les boutons sont les objets uniquement liés à l'outil (en bleu). Les onglets pour la saisie des données et les feuilles de résultats sont explicitement orientées vers les aspects de la durabilité (en vert). Ils adoptent alors majoritairement un point de vue d'interface entre le système et son environnement (au sens écologique, économique et social). Les feuilles de calculs d'impacts et les feuilles de de modification des données sont quant à elles tournées vers les sous-systèmes qui composent le système de production d'huile d'olive vierge (en gris). Elles privilégient un point de vue interne sur le système. L'outil &cOlive proposent ainsi explicitement un modèle fédéré d'évaluation de la durabilité d'un système de production d'huile d'olive guidée par l'approche procédé-produit-entreprise.

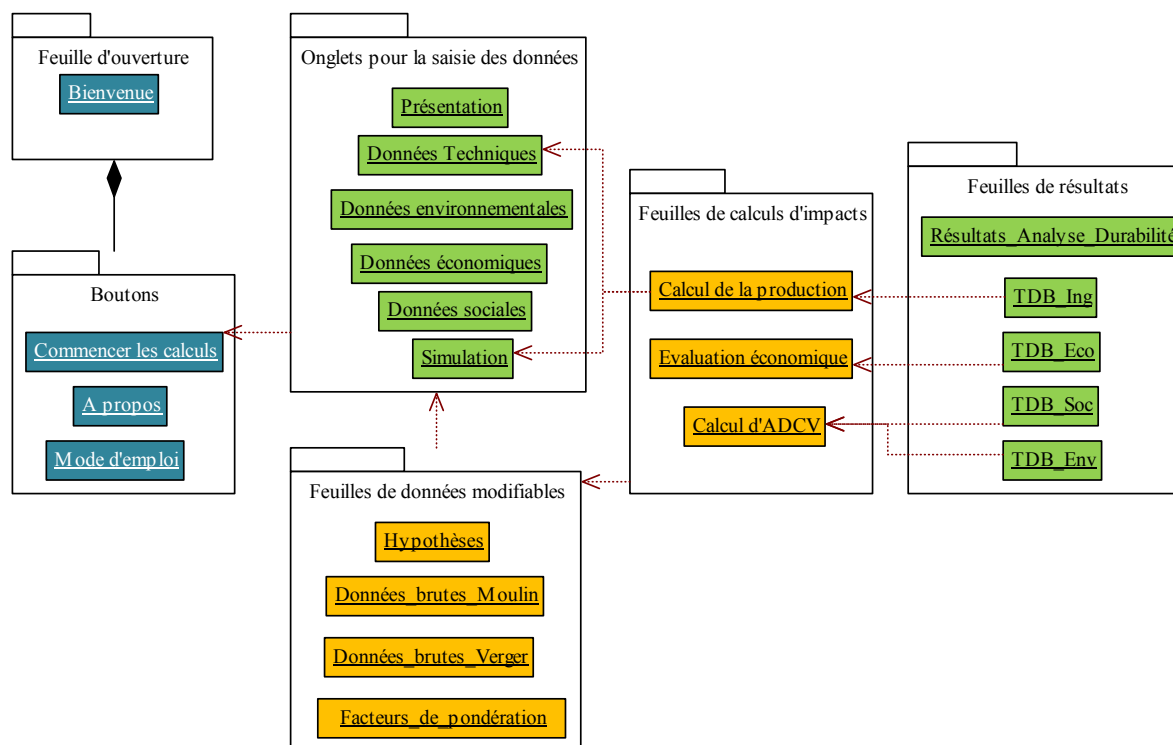


Figure 32. Structure générale de l'outil &cOlive

L'outil suit une logique « du bas vers le haut » procédé-produit-entreprise en proposant de commencer l'évaluation par la modélisation du procédé d'extraction de l'huile d'olive vierge. Pour des problèmes de caractérisation et de modélisation des propriétés thermodynamiques des olives et des produits issus de son extraction, le bilan enthalpie n'a pas été établi. Seul le bilan matière a été implémenté. Ce dernier permet de déterminer les paramètres, les intrants et les sortants du procédé utilisés dans le modèle de produit. Ainsi, le modèle de procédé correspond ici à un modèle en boîte grise. Par la suite, les résultats de la simulation du procédé sont injectés dans le modèle de produit qui est également un modèle en boîte grise dans la mesure où les différentes phases du cycle de vie, les différents processus qui y ont lieu et leur séquence sont connus. Les modèles d'entreprise utilisés dans l'outil &cOlive sont considérés comme des modèles en boîte noire.

L'outil &cOlive est conforme à l'approche P²E et permet l'évaluation des trois volets de la durabilité suivant les caractéristiques du chapitre 7. Les objets d'&cOlive peuvent être liés à une ou plusieurs étape de l'approche P²E (Figure 33), illustrant ainsi la complexité des interfaces entre le système global et son environnement extérieur. En effet, il convient de rappeler que l'approche P²E est structurée selon deux axes selon lesquels les résultats peuvent être présentés : un axe systémique (répartition des résultats entre les différents systèmes) et un axe de la durabilité (réparti-

tion des résultats entre les différents volets de la durabilité). Cette double vision possible est représentée par la figure 14.

Chaque volet de l'évaluation aboutit à des indicateurs de nature hétérogène à partir desquels un choix doit pouvoir être réalisé. S'agissant d'un outil d'aide à la décision, il propose un tableau de bord qui contient les indicateurs techniques, environnementaux, économiques, sociaux et de pertinence de l'étude. Ce tableau de bord pour la durabilité reprend l'analyse multicritère présentée dans la section 6.4.3.2.

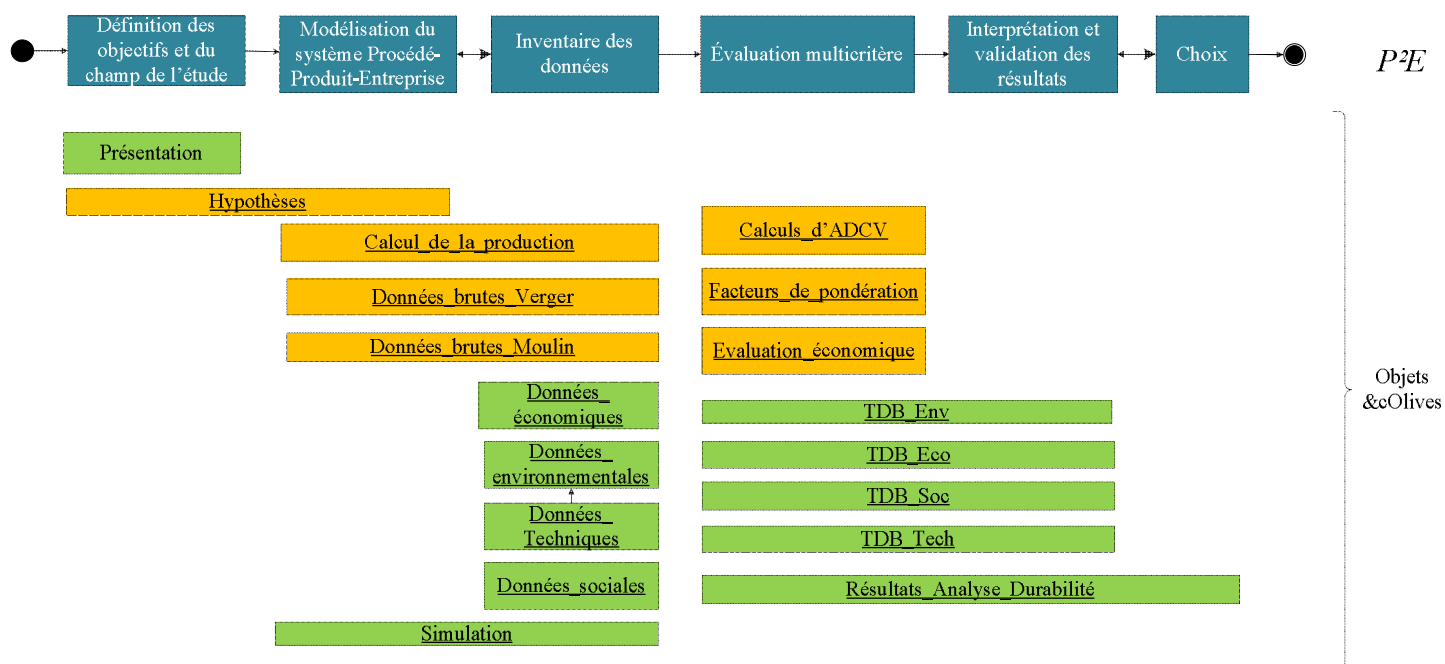


Figure 33. Objets d'&cOlive et étape de P²E

L'approche P²E met l'entreprise au cœur de l'outil. Or comme tout système agro-industriel décrit dans le chapitre précédent, le système de production d'huile d'olive est constitué de deux systèmes « entreprise » à savoir le verger et le moulin (section 7.1). L'oléiculteur et le moulinier sont les managers respectifs du verger et du moulin. Pour chacun des trois piliers de la durabilité, les données à saisir sont à chaque fois distinguées selon ces deux systèmes verger et entreprise. Les aspects techniques ne concernant que la modélisation du procédé d'extraction de l'huile d'olive vierge, les données connexes ne sont pas déclinées selon les deux points de vue susmentionnés. Après avoir saisi l'ensemble des champs requis dans les cinq premiers onglets de la boîte de dialogue qui s'ouvre en cliquant sur le bouton « Commencer les calculs », il faut cliquer sur le bouton « Lancer la simulation » dans l'onglet « Simulation ». Le programme simule alors le procédé d'extraction. Les résultats sont ensuite utilisés pour le modèle de produit et ses aspects environnemen-

taux et les coûts de son cycle de vie. &cOlive permet de choisir différents scénarios d'oléiculture et différents scénarios d'extraction de l'huile vierge. L'évaluation économique du système selon les deux points de vue et l'analyse sociale du cycle de vie sont ensuite réalisées. Les résultats de l'évaluation sont présentés sous forme de tableaux et graphiques dans les cinq feuilles suivantes: « TDB_Env », « TDB_Éco », « TDB_Tech », « TDB_Soc » et « TDB_Durabilité ». Chacune des cinq feuilles reprend les indicateurs des volets environnementaux, économique et sociaux et les indicateurs techniques. Les calculs reposent sur une base de données contenue dans la feuille « Facteurs_de_pondération ». Finalement, les facteurs d'incertitudes et la qualité des données sont déterminés à l'aide de la matrice de pédigrée de la feuille « Matrice_de_pédigrée ». Il convient de noter qu'&cOlive permet d'évaluer l'incertitude sur les données d'entrée mais ne permet pas l'implémentation d'une méthode de propagation telle que la simulation de Monte Carlo.

8.2 Structure détaillée

Afin de préciser la manière dont l'approche P²E est implémentée dans &cOlive, ce sous-chapitre propose de détailler sa structure par la présentation des objets de l'application.

8.2.1 Feuilles de démarrage

L'ouverture d'&cOlive amène directement l'utilisateur sur la feuille « Bienvenue ». Cette dernière contient trois boutons. Le premier intitulé « Mode d'emploi » fait apparaître une fenêtre à quatre onglets dont le premier décrit l'outil et fournit la légende. Cette dernière permet à l'utilisateur de repérer aisément par différentes couleurs les différents types de données (à renseigner, normales, calculés). Chacun des trois autres onglets présente les méthodes d'évaluation propres à chaque volet de la durabilité (bilan matière pour le volet technique, AdCV pour les ACV environnementale, des coûts et sociale et enfin l'évaluation économique). Un bouton « À propos » donne accès aux auteurs de l'outil ainsi qu'aux projets supports. Un troisième bouton nommé « Commencer les calculs » ouvre une boîte de dialogue intitulée « Initialisation des données ». La figure 34 présente les différentes fenêtres proposées au démarrage de la solution.

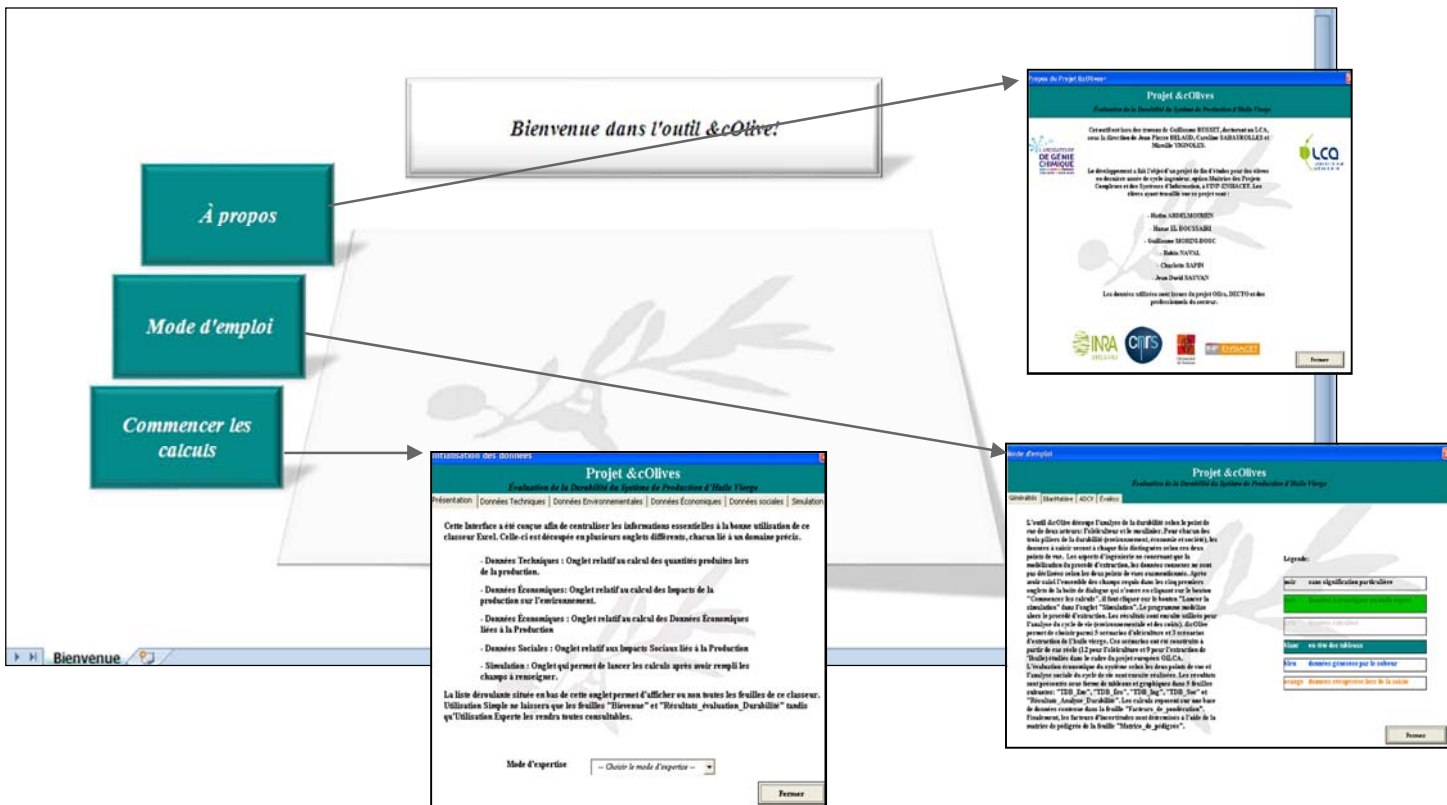


Figure 34. Fenêtres de démarrage de l'outil

8.2.2 Onglets pour la saisie des données initiales

La boîte de dialogue « Initialisation des données » est constituée de six onglets qui mettent en évidence les différents volets de la durabilité. Elle implémente en partie les données d'inventaire nécessaires à l'évaluation de la durabilité du système de production de l'huile d'olive vierge. L'onglet « Présentation » permet d'avoir un aperçu de la boîte de dialogue et de son intérêt. Les onglets « Données Techniques », « Données Environnementales », « Données économiques » et « Données Sociales » contiennent les données à renseigner pour les calculs. Il convient de remarquer que les données à renseigner sont réparties par volet de la durabilité et non par système « procédé-produit-entreprise ». Finalement, un dernier onglet « Simulation » lance le calcul d'ingénierie et d'évaluation de la durabilité du système production d'huile d'olive vierge défini par les données saisies.

L'ouverture de la boîte de dialogue amène l'utilisateur sur l'onglet « Présentation ». La figure 35 montre la boîte de dialogue ouverte sur cet onglet. Les autres onglets qui la composent y sont également visibles.

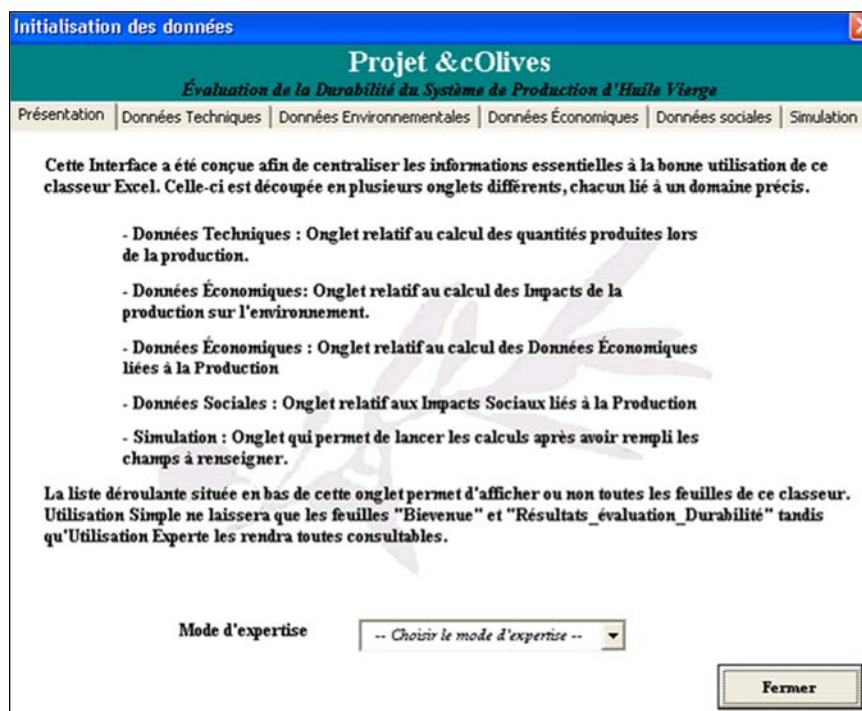


Figure 35. Présentation de la boîte de dialogue

Cet onglet permet de choisir entre le mode « simple » et le mode « expert ». Le premier n'affiche que les feuilles « Bienvenue », « Calcul de la production » et « TDB_Durabilité » tandis que le second affiche l'ensemble des seize feuilles qui constituent l'outil &cOlive (« Bienvenue », « hypothèses », « Données brutes verger », « Données brutes moulin », « Calcul de la Production », « AdCV_intermédiaire_Vergers », « AdCV_intermédiaire_Moulin », « CalculEvalEcoVerger », « CalculEvalEcoMoulin », « Facteurs_de_pondération », « Matrice_de_pédigrée », « TDB_Tech », « TDB_Env », « TDB_Eco », « TDB_Soc » et « TDB_Durabilité »).

8.2.2.1 Données techniques

Afin de réaliser le bilan matière du procédé d'extraction de l'huile d'olive vierge, la boîte de dialogue propose de saisir les données techniques nécessaires. C'est à ce niveau qu'il faut sélectionner le type de procédé d'extraction à modéliser (Figure 36). La présence de plusieurs alternatives sur les procédés d'extraction peut permettre d'orienter des choix de conception préliminaire et détaillée vers la durabilité du système « procédé-produit-entreprise ». Ainsi, l'outil &cOlive constitue un outil de conception durable de procédé.

initialisation des données

Projet &cOlives

Évaluation de la Durabilité du Système de Production d'Huile Vierge

Présentation | Données Techniques | Données Environnementales | Données Économiques | Données sociales | Simulation

Surface cultivée totale ha

Quantité d'Olives produites et traitées t/an

- Pourcentage Massique en Eau : %

- Pourcentage Massique en Matière Grasse : %

- Pourcentage Massique en Matière Sèche : %

Quantité d'Eau Utilisée m3/an

Rapport Huile extraite/Olives Traitées L/kg

Technologie d'extraction

Figure 36. Données d'ingénierie à saisir

8.2.2.2 Données environnementales

L'onglet « Données environnementales » permet de récolter les informations nécessaires à l'AcCVet l'AcCV, notamment l'unité fonctionnelle (produire 1 L d'huile d'olive vierge ou produire 1 kg d'olives à huile) et un scénario d'oléiculture élaboré à partir de 3 paramètres (le type de culture (biologique ou conventionnelle), l'intensité de la culture (traditionnelle, intensive ou super-intensive) et l'irrigation (avec ou sans)). Le scénario d'extraction est déjà choisi lors de la saisie des données nécessaires au bilan matière. L'onglet « Données environnementales » invite également à renseigner certains paramètres du système de production d'huile d'olive vierge (Figure 37). Il ne distingue pas les données selon le point de vue sur le système.

Figure 37. Données environnementales à saisir

Toutes les données renseignées dans les onglets « Données environnementales » sont renvoyées dans les feuilles « Hypothèses », « Données brutes verger » et « Données brutes moulin ». Ces dernières comprennent le modèle de produit et le modèle d'entreprise du secteur agro-industriel et correspondent à l'implémentation du modèle de système P²E et de son inventaire de données. Les calculs évaluation d'impacts intermédiaires sont implémentées dans les feuilles « AdCV_intermédiaire_Verger » et « AdCV_intermédiaire_Moulins ». Ils expriment les flux des données brutes par unité fonctionnelle puis calculent les scores d'impacts en multipliant les flux de substances par le facteur d'impact correspondant (Équation 1).

8.2.2.3 Données économiques

La figure 38 montre les données à renseigner pour l'évaluation économique de la partie oléicole (sous-système verger) et de la partie industrielle (sous-système moulin).

Initialisation des données

Projet &cOlives
Évaluation de la Durabilité du Système de Production d'Huile Vierge

Présentation | Données Techniques | Données Environnementales | **Données Économiques** | Données sociales | Simulation

	Verges	Moulin	
Taux d'imposition	33	33	%
Taux d'actualisation	10	10	%
Valeur de l'emprunt	9000	90000	€
Période de l'emprunt	10	10	années
Taux d'intérêt	10	10	%
Total des recettes annuelles	40000	250000	€/an
Investissement initial	17000	180000	€
Total des dépenses annuelles (hors investissement et emprunt)	30000	120000	€/an

Figure 38. Données économiques à saisir

L'onglet « Données Économiques » de la boîte de dialogue permet de renseigner les informations nécessaires au calcul des trois indicateurs de l'évaluation économique des sous-systèmes « verges » et « moulin ». Une fois les données saisies, elles sont renvoyées dans les feuilles « CalculE-valEcoVerges » et « CalculE-valEcoMoulin ». Ces dernières calculent automatiquement les trois indicateurs économiques qui caractérisent les entreprises (BACT, TRIU, i_r).

8.2.2.4 Données sociales

	Verger	Moulin	
Nombre d'accidents fatals par an	0	0	#
Mesure de prévention des risques du travail	Oui	Oui	
Protocole d'urgence en cas de blessures ou d'accident	Oui	Oui	
Protocole d'urgence en cas d'exposition à des produits chimiques dangereux (pesticides)	Oui	Non	
Présence et utilisation d'équipement de protection dans les situations qui le nécessitent	Oui	Oui	
Nombre d'emplois temps plein	1	1	#
Qualité et nombre d'informations disponibles concernant les propriétés nutritives et organoleptiques du produit	Suffisant	Suffisant	
Nombre de plaintes ou de mécontentements concernant le produit vendu	0	1	#
Pourcentage de travailleurs locaux	100	100	%
Employés avec un haut niveau d'étude	100	100	%
Certifications		ISO 14001	

Figure 39. Données sociales à saisir

Le volet social de l'AdCV puise ses données dans l'onglet « Données sociales » (Figure 39). La distinction entre les deux points de vue susmentionnés est faite pour cet aspect de l'AdCV renforçant l'idée selon laquelle l'AsCV n'est orientée pas produit mais entreprise. Toutes les données renseignées dans l'onglet « Données sociales » sont renvoyées dans les feuilles « Données brutes verger » et « Données brutes moulin ». Les calculs d'évaluation d'impacts intermédiaires sont implémentés dans les feuilles « AdCV_intermédiaire_Verger » et « AdCV_intermédiaire_Moulins ».

Après avoir rempli tous les champs proposés dans la boîte de dialogue, la simulation est prête à être lancée. Le bouton « lancer la simulation » dans l'onglet « simulation » renvoie l'utilisateur vers la feuille « Calcul de la production » dans laquelle se trouve le bouton « Calculer le bilan matière ». Dans l'ordre, le bilan matière est effectué puis l'AdCV puis l'évaluation économique. L'ensemble des résultats apparaît dans les cinq feuilles de résultats « TDB ». Si le mode expert a été sélectionné, toutes les feuilles du classeur s'affichent. Trois seulement sont modifiables par l'utilisateur : les feuilles « Hypothèses », « Données_brutes_verger » et « Données_brutes_moulin ».

8.2.3 Feuilles de modification de données et paramètres

8.2.3.1 Modification des hypothèses

Les résultats auxquels mène l'outil reposent sur un certain nombre d'hypothèses qui sont rassemblées dans la feuille éponyme. L'outil ne rassemble que les hypothèses quantifiables. Certaines sont suffisamment génériques pour ne pas nécessiter de modification. En revanche, d'autres déterminent le système et présentent une incidence sur les résultats d'analyse. Ces données sont modifiables, soit lors de la saisie des données dans la boîte de dialogue, soit directement dans la feuille qui apparaît en mode expert.

8.2.3.2 Modification des données brutes

Pour modéliser le système de production d'huile d'olive vierge, l'outil reprend toutes les phases du cycle de vie et les organise en deux parties décrites dans deux feuilles distinctes (« Données_brutes_verger » et « Données_brutes_moulin ») : (i) la partie agronomique (ou oléicole) qui correspond au système de production des olives incluant tous les processus appliqués au verger d'oliviers, (ii) et la partie industrielle qui correspond au système d'extraction de l'huile. Ce dernier inclut les processus d'extraction de l'huile au moulin auxquels s'ajoutent la distribution et la fin de vie des bouteilles d'huile d'olive vierge. Les données brutes proviennent des informations fournies par les professionnels du secteur. Elles sont dites brutes par comparaison aux données d'inventaire qui correspondent aux données brutes modifiées par l'application de facteurs qui rapportent toutes les valeurs à l'unité fonctionnelle. Les données concernent non seulement des flux de matière et d'énergie qui transitent à travers les deux systèmes qui constituent le système de production d'huile d'olive vierge, mais aussi des caractéristiques du système. Dans les deux feuilles de données brutes, chaque donnée peut être modifiée par l'utilisateur en mode expert. Cette feuille contient le modèle de produit et une partie du modèle d'entreprise de l'approche P²E. Par ailleurs, l'outil Olive permet d'implémenter une analyse de la qualité des données et le calcul de l'incertitude moyenne des données brutes dans cet onglet. Un exemple de feuille de données brutes est fourni en annexes 7 et 8.

Après avoir vérifié et modifié les trois feuilles modifiables, l'utilisateur en mode expert peut accéder aux cinq feuilles qui convertissent les données brutes en données d'inventaire puis en impacts intermédiaires. La première feuille de calcul s'intitule « Calcul de la production ». Viennent ensuite deux feuilles d'analyse de cycle de vie (« AdCV_intermédiaire_Verger » et « AdCV_intermédiaire_Moulin ») et deux feuilles d'évaluation économique (« CalculEvalEcoVerger » et « CalculEvalEcoMoulin »). Ces dernières implémentent les modèles d'évaluation.

8.2.3.3 Base de données

Pour appliquer la pensée cycle de vie à l'évaluation de la durabilité, le recours à des bases de données d'inventaire de cycle de vie est indispensable. En outre, elles sont complétées par des bases de données d'évaluation d'impacts incluant des facteurs d'impacts intermédiaires, des facteurs de dommages, des facteurs de normalisation et des facteurs de pondération qui permettent une analyse multicritère par somme pondérée. La base de données de l'outil Olive contient les facteurs de pondération utilisés pour le calcul des indicateurs environnementaux, sociaux et économiques à partir des flux de matière, d'énergie et de ressources humaines qui caractérisent le système de production d'huile d'olive (Annexe 12). Pour des raisons pratiques, les différentes bases de données qui interviennent tout au long de l'approche P²E (Figure 19) sont rassemblées dans une base de données unique.

8.2.4 Feuilles de calculs d'impacts

8.2.4.1 Modèle de procédé d'extraction

Le modèle d'extraction de l'huile implémente le modèle de procédé (*Flowsheet*) d'extraction de l'huile d'olive vierge dans la feuille « Calcul de la production » (Figure 40).

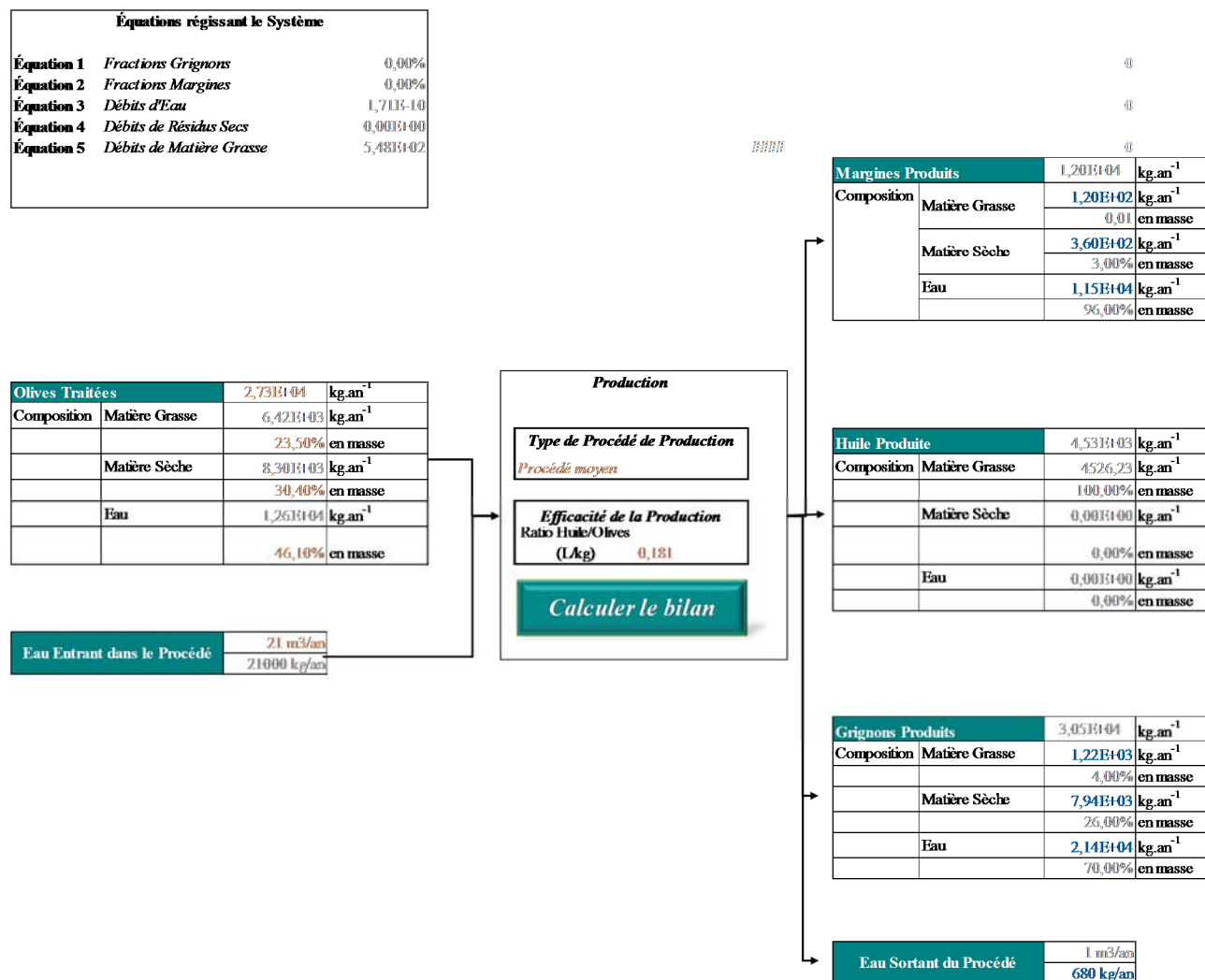


Figure 40. Flowsheet du procédé d'extraction de l'huile d'olive vierge

Le modèle développé permet de déterminer la quantité et la composition de chaque courant de sortie à partir de la quantité et de la composition de chaque courant d'entrée. Les informations nécessaires sont à saisir dans l'onglet « Données Techniques » de la boîte de dialogue. Il s'agit de renseigner la quantité d'olives traitées dans le procédé ainsi que sa composition en eau, huile et matière sèche, d'indiquer la quantité d'eau utilisée dans le procédé et de choisir la technologie d'extraction parmi les trois plus courantes (presse, système 2-phases ou système 3-phases). Pour la simulation du procédé, le modèle permet de calculer les quantités et compositions des courants d'huile d'olive vierge, de grignons, de margine et d'eau sortant annuellement du procédé (Figure 40).

8.2.4.2 Évaluation de la durabilité du cycle de vie

Les deux feuilles d'évaluation de la durabilité du cycle de vie sont structurées de manière identique. Les données d'inventaire exprimées par unité fonctionnelle sont calculées puis les impacts

environnementaux intermédiaires et les coûts du cycle de vie sont calculés. Les données sociales sont également traduites en impacts sociaux dans ces deux feuilles. Ces deux feuilles implémentent les méthodes d'évaluation AsCV, AeCV et AcCV et modélisent le produit et l'entreprise.

8.2.4.3 Évaluation économique

L'évaluation économique des deux systèmes « entreprise » (verger et moulin) est implémentée. Les indicateurs classiques décrits dans la sous-section 6.4.2.2 sont calculés. L'approche entreprise et le volet économique de la durabilité sont implémentés via ces deux onglets.

Les cinq feuilles de calcul d'impacts (« Calcul de la production », « AdCV_intermédiaire_Verger », « AdCV_intermédiaire_Moulin », « CalculEvalEcoVerger » et « CalculEvalEcoMoulin ») reposent sur des bases de données contenues dans l'onglet « facteurs de pondération ».

8.2.5 Feuilles de résultats

Les tableaux de bord constituent les feuilles affichées en mode expert qui permettent à l'utilisateur d'accéder à une analyse plus fine du système et de ses impacts. En mode simple, l'utilisateur n'a accès qu'au dernier tableau de bord. Les tableaux de bord sont tous construits de la même façon avec un tableau de synthèse des impacts et une représentation graphique pour faciliter l'analyse (Figure 41).

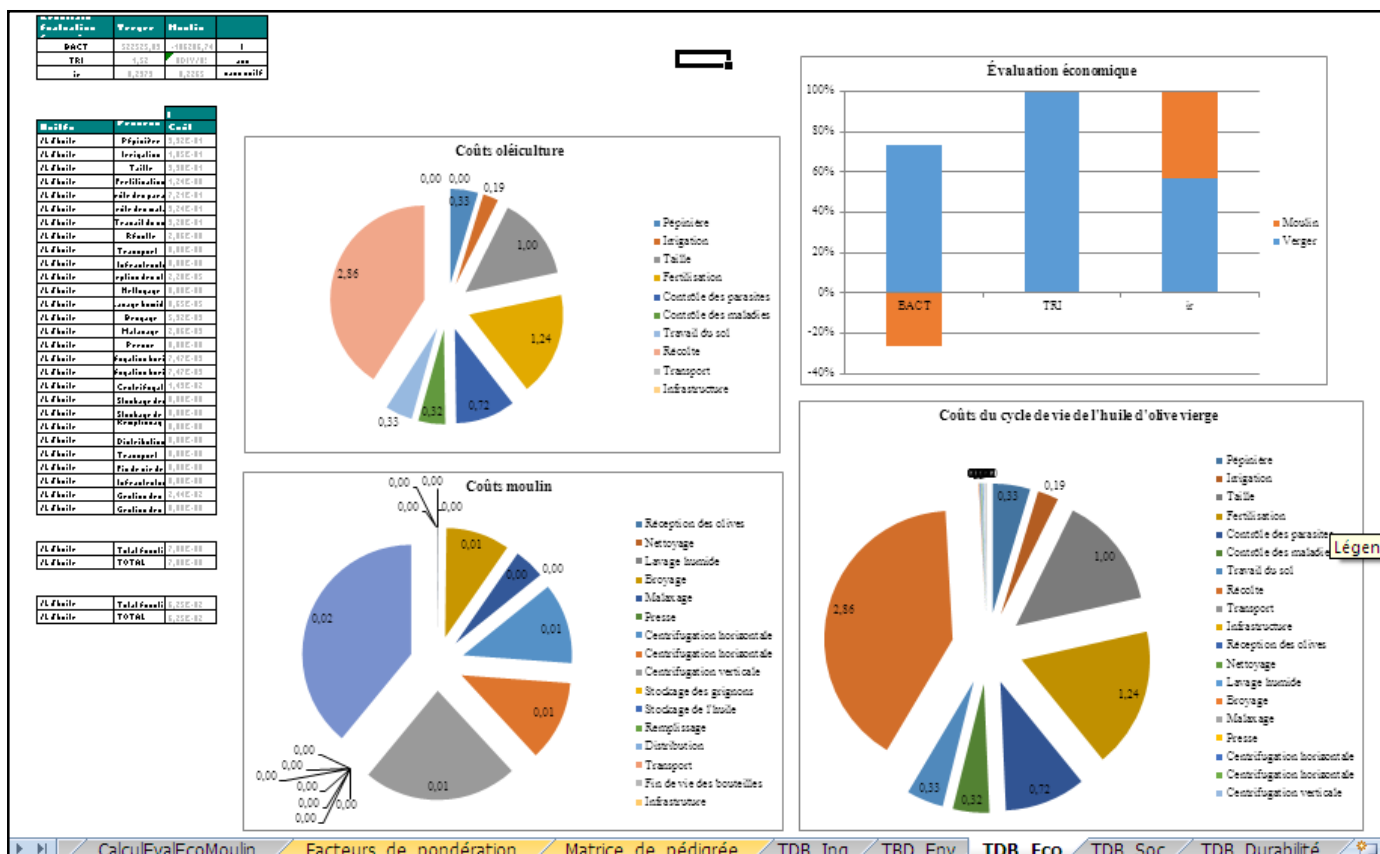


Figure 41. Exemple de tableau de bord

8.2.5.1 Technique

Les résultats du bilan matière sont repris dans le tableau de bord technique. Un seul indicateur technique a été retenu. Il correspond au rapport entre la quantité d'huile extraite et la quantité de matière grasse totale contenue dans les olives entrantes. Il est nommé « rendement du procédé ».

8.2.5.2 Environnement

Le tableau de bord environnemental présente les indicateurs environnementaux sélectionnés pour l'étude. Il fournit leur valeur générée dans les feuilles « AdCV_intermédiaires_Verger » et « AdCV_intermédiaires_Moulin » et ce, pour chaque processus des deux sous-systèmes qui constituent le système de production d'huile d'olive.

8.2.5.3 Économie

Afin d'évaluer les impacts économiques liés à l'huile d'olive, le tableau de bord économique fait appel aux résultats d'AcCV issus des feuilles « AdCV_intermédiaires_Verger » et « AdCV_intermédiaires_Moulin » d'une part et aux résultats de l'évaluation d'économique de l'entreprise d'autre part (feuilles « CalculEvalEcoVerger » et « CalculEvalEcoMoulin »). Les

résultats d'AcCV sont détaillés jusqu'au niveau des processus des deux sous-systèmes, contrairement aux résultats de l'évaluation économique qui se basent sur des données globales au niveau de chaque sous-système.

8.2.5.4 Social

Pour la présentation des impacts sociaux, la feuille « TDB_Soc » rassemble les résultats de l'AsCV contenus dans les feuilles « AdCV_intermédiaires_Verger » et « AdCV_intermédiaires_Moulin ». Comme pour les résultats d'évaluation économique, les résultats des impacts sociaux du cycle de vie ne peuvent pas être détaillés au niveau des processus. Ils concernent le niveau global des deux sous-systèmes.

8.2.5.5 Durabilité

Le dernier tableau de bord synthétise les quatre autres en reprenant tous les indicateurs qu'ils contiennent. Il ajoute alors deux indicateurs de pertinence de l'étude pour rendre compte de la pertinence de l'étude et des résultats obtenus. Le premier permet de vérifier que le bilan matière est respecté en établissant le rapport entre la matière totale entrante (eau et olives) et la matière sortante (eau, huile, grignons et margines). Il s'agit de l'indicateur « respect du bilan matière ». Le second correspond à l'incertitude moyenne sur les données d'inventaire.

Les décisions étant prises au niveau des deux sous-systèmes (verger et moulin) et au niveau du système de production d'huile d'olive, il a semblé pertinent de ne pas présenter les résultats à un niveau de granularité plus fin. Les résultats du système de production d'huile d'olive vierge sont égaux à la somme des résultats des deux sous-systèmes. Une analyse multicritère permet d'agréger les indicateurs d'un volet donné d'évaluation en plusieurs étapes pour finalement aboutir à un critère d'un niveau donné (2 ou 3) unique par volet.

À ce niveau d'analyse, il convient de préciser la valeur des bornes l'intervalle moyen du rendement du procédé d'extraction d'huile d'olive qui va servir à évaluer l'efficacité du procédé. Ainsi, un procédé sera dit efficace si son rendement est compris entre 75 % et 86 %. La valeur supérieure de l'intervalle correspond aux très bons rendements d'extraction à froid.

8.3 Limites

L'outil &cOlive est un outil interactif qui permet à l'utilisateur de réaliser une évaluation de la durabilité du système de production d'huile d'olive vierge. Il est basé sur l'approche P²E appliquée à l'agro-industrie. Les modèles de produit, d'entreprise et de procédé sont spécifiques au

secteur étudié. Afin de valider les résultats que fournit l'outil &cOlive, la partie environnementale de l'étude a été implémentée dans le logiciel d'ACV SimaPro. À partir du même scénario donc du même jeu de données, &cOlive aboutit aux mêmes résultats d'impacts environnementaux que SimaPro, validant ainsi la solution développée.

L'outil &cOlive n'implémente pas de bilan enthalpie. Néanmoins, les travaux de Gillani (2013) ont montré qu'il était possible d'implémenter un bilan enthalpie dans le cadre d'une approche procédé-produit. En outre, l'implémentation du simulateur de procédé et les résultats du bilan matière qui en découlent n'ont pas été validés par l'utilisation d'un outil de simulation de procédé reconnu.

Dans &cOlive, les modèles de procédé et de produit sont liés par les résultats de la simulation du procédé. Faute de données suffisantes, il n'a pas été possible de lier mathématiquement le modèle d'entreprise avec les autres.

L'approche P²E générique (Chapitre 6) comprend une étape de choix qui clôt le processus d'aide à la décision. L'outil &cOlive ne propose pas d'implémentation d'une technique formelle de décision de groupe mais propose les tableaux de bord qui lui sont nécessaires. Par ailleurs, en conception préliminaire ou en conception détaillée, l'outil pourrait être couplé à des outils d'optimisation multi-objectifs pour rechercher le meilleur compromis procédé-produit-entreprise.

Finalement, la phase d'intelligence du processus de décision qui consiste en la structuration et la formalisation des contraintes et exigences (modèle SysML, OCL) n'est pas effectuée.

Chapitre 9. Conclusion

La conception de l'approche P²E laisse entrevoir un potentiel de connaissance de maîtrise du système « procédé-produit-entreprise » complet. Le couplage avec de l'optimisation multicritère et avec un processus de décision finale rend le modèle de l'approche complet et à même de supporter une décision à prendre quel que soit le niveau de dérivation du modèle du système.

Cependant, chaque message récupéré par l'acteur transversal ingénieur pour la durabilité repose sur le modèle d'un métier donné. Dans le cas de l'approche P²E, les sous-systèmes qui composent l'entreprise restent des modèles en boîtes noires. Afin de rendre l'approche plus complète, la modélisation du procédé sous forme de boîte blanche pourrait être étendue aux autres sous-systèmes tels que la logistique, les ressources humaines, etc.

L'implémentation de l'approche P²E dans l'outil &cOlive dédié à la production d'huile d'olive vierge permet d'illustrer sur un exemple concret de système agro-industriel la mise en œuvre de l'approche partielle qui dérive de l'approche générique. Bien que la solution logicielle &cOlive soit construite pour un secteur agro-industriel donné, tout porte à croire que son adaptation à un autre système agro-industriel ne demandera qu'un effort modéré à un utilisateur expert tel que l'ingénieur en durabilité des systèmes.

En termes de durabilité, l'approche générique P²E se place dans une perspective de durabilité faible ou forte. En revanche, l'approche partielle appliquée à l'agro-industrie et proposée dans cette partie vise la durabilité forte par le choix d'un niveau d'agrégation partielle des trois critères de la durabilité (environnemental, social et économique).

Par ailleurs, en tant qu'approche d'évaluation de la durabilité des systèmes appliquée aux phases de conception préliminaire et détaillée, l'approche P²E peut être située selon les six dimensions qui caractérise toute méthode de conception (Gagnon *et al.*, 2012) :

- ✓ *la structure du processus de conception* : L'approche P²E ne propose pas de structure du processus de conception ;
- ✓ *le champ de l'étude couvert, c'est-à-dire le nombre de problèmes de la durabilité traités* : l'approche P²E couvre les trois volets de la durabilité ;
- ✓ *la pertinence des indicateurs sélectionnés* : l'approche P²E fait appel à des indicateurs qui caractérisent l'environnement, la société et l'économie *a priori* pertinents ;

- ✓ *la précision des outils d'évaluation* : avec une incertitude située entre 20 % et 30 %, l'approche P²E implémentée dans l'outil &cOlive présente une précision de l'ordre de celle qui pourrait être attendue dans des phases de conception préliminaire ou détaillée ;
- ✓ *les améliorations potentielles à attendre des alternatives évaluées* : théoriquement, l'approche P²E offre la possibilité d'évaluer plusieurs alternatives. Les améliorations escomptées se situent au niveau d'une augmentation de la durabilité du système à concevoir ou reconcevoir par comparaison des différentes alternatives.
- ✓ *la prise de décision* : l'approche P²E s'inscrit dans un processus de décision. La dernière des six étapes de l'approche est celle du choix de conception qui découle de l'évaluation de la durabilité du système. les cinq critères d'évaluation proposés par l'approche. Néanmoins, l'approche ne formalise pas l'étape de choix.

À la lumière de cette partie, l'approche P²E semble adaptée à l'évaluation de la durabilité des systèmes. Il reste à la tester à travers l'application de l'outil &cOlive pour analyser le système de production d'huile d'olive vierge.

Partie C. Application à la production de l'huile d'olive vierge

La partie C présente l'application de l'approche P²E proposée et implémentée dans la partie B à l'agro-industrie oléicole française. L'intérêt de l'application de l'approche P²E réside d'une part dans sa validation sur un cas réel et d'autre part dans l'évaluation de la durabilité de la production d'huile d'olive vierge en France.

Actions de dissémination liées à cette partie :

(Busset *et al.*, 2012a) *Life Cycle Assessment of Olive Oil Production in France*. In Proceedings of the International Conference WASTEENG 2012, 4:987–992. Porto, Portugal, A. Nizhou & F. Castro.

(Busset *et al.*, 2011) *OiLCA project: enhancing competitiveness and reducing carbon footprint of olive oil processes through waste management optimisation using life cycle assessment*. Conférence ECOTECH'S & TOOLS, Montpellier, France.

(Busset *et al.*, 2012b) *Life cycle assessment of treatment processes of solid waste from the olive oil sector*. In the 8th International Conference on Renewable Resources & Biorefineries, Toulouse, France.

(Busset *et al.*, 2012c) *Influence de la durée de vie d'un système agro-industriel sur les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie*. Conférence ECOTECH'S 2012 : évaluation environnementale et ACV : quels usages pour les acteurs publics et privés? Montoldre, France.

(Busset *et al.*, 2013b) *Eco-conception des agro-procédés: application à la production d'huile d'olive*, XIV^{ème} congrès de la Société Française de Génie des Procédés, Lyon, France.

Chapitre 10. Objectifs & champ de l'étude

Ce chapitre de définition des objectifs et du champ de l'étude présente le cadre général de l'étude du système de production d'huile d'olive vierge. Il correspond à la première étape de l'approche P²E (Figure 42).



Figure 42. Chapitre 10 et approche P²E

Les informations présentées concernent a priori les trois niveaux d'approche du système, à savoir le procédé, le produit et l'entreprise. Si nécessaire, il sera précisé à quel sous-système sont appliquées certaines hypothèses spécifiques.

10.1 Contexte & objectifs : projet OiLCA

Aucun des domaines industriels ou agro-industriels n'échappe à la nécessité de connaître la durabilité de ses produits et procédés sur l'ensemble de leur cycle de vie. C'est pourquoi certains acteurs de la filière de production d'huile d'olive et certains acteurs du monde de la recherche ont élaboré le projet OiLCA accepté et financé par le Fonds Européen pour le Développement Économique des Régions (FEDER) dans le cadre de l'initiative communautaire Interreg IVB SUDOE. Cinq acteurs ont participé au projet OiLCA : le *Centro de Innovación y Tecnología del Olivar y del Aceite (CITOLIVA)* de Mengibar en Espagne, *Fundació Centre Tecnològic* de Manresa (CTM) en Espagne, *Instituto Andaluz de Tecnología (IAT)* de Séville en Espagne, *Centro para a Valorização de Resíduos (CVR)* de Guimarães au Portugal et le Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA) de Toulouse. En France, le LCA a étroitement collaboré avec le Centre Technique de l'Olivier (CTO) d'Aix-en-Provence pour obtenir un nombre important d'informations sur le secteur oléicole français. Ainsi, les objectifs du projet consistaient à évaluer la durabilité du système de production d'huile d'olive. La portée de l'évaluation comporte deux aspects : d'un côté l'application de la démarche permet d'accompagner les acteurs du secteur dans la phase de conception préliminaire ou de re-conception du système dans une démarche d'amélioration continue et de conception durable ; de l'autre côté, l'application est tournée vers l'évaluation d'un système existant dans le but de communiquer sur ses impacts. Afin de réduire le champ de l'étude, seul la production française d'huile d'olive vierge est évaluée. Le projet OiLCA permet d'appliquer l'approche P²E sur des cas réels et de la valider. Les chapitres de la partie C présen-

tent les résultats de l'application de l'approche P²E à la production d'huile d'olive vierge. Bien que les cas d'étude soient français, le système de production d'huile d'olive vierge étant soumis à des procédures et procédés bien encadrés, les résultats pourraient être extrapolés à des systèmes d'autres régions et pays. Sauf mention contraire, la modélisation du système et des impacts sur la durabilité présentés dans cette partie ainsi que les résultats d'analyse ont été supportés par l'implémentation de l'outil Olive décrit dans le chapitre 8.

10.2 Fonction & unité fonctionnelle

La définition de la fonction du système et de l'unité fonctionnelle (UF) caractérise surtout le sous-système « produit » du système agro-industriel de production d'huile d'olive. L'UF sert de référence à laquelle sont rapportés les résultats d'évaluation environnementale (AeCV) et d'évaluation des coûts du cycle de vie (AcCV) (Chapitre 7).

Le système agro-industriel étudié pour la validation de l'approche est celui de la production d'huile d'olive vierge. Sa fonction est de produire de l'huile d'olive vierge ou vierge extra. Son unité fonctionnelle est « produire un litre d'huile d'olive vierge ». Le cycle de vie du produit s'étend du verger à la fin de vie des contenants en passant par les phases de culture, de récolte, de transport, d'extraction, de mise en bouteille, de distribution et d'utilisation.

Pour ce type de système, l'analyse de la littérature a montré qu'une unité fonctionnelle basée sur une quantité d'olives destinées à la production d'huile permettait de s'affranchir de certaines contraintes liées à la définition de l'huile d'olive (sous-chapitre 4.2). En effet, cette dernière peut être vierge extra, vierge, lampante, de grignons, de ressource, raffinée, etc. À partir de cette diversité d'huiles, des comparaisons non fondées risquent de mener à des conclusions erronées. Outre cette éventuelle erreur d'interprétation, le choix d'une quantité d'olives comme unité fonctionnelle permet d'éviter le délicat processus d'allocation des flux pour un système multifonctionnel comme la plupart des systèmes agro-industriels. Néanmoins, dans une approche procédé-produit grâce à laquelle le rendement d'extraction pourrait différer, le choix d'une UF en kilogramme d'olives ne pourrait pas rendre compte des résultats de la simulation. En outre, dans le cas de la filière française et contrairement aux filières espagnole et italienne, seul l'huile vierge ou vierge extra est produite. Ainsi, le problème d'allocation des flux entre les différents produits du système ne se pose pas. C'est pourquoi l'unité fonctionnelle choisie pour la présente étude correspond à la production d'un litre d'huile d'olive vierge et non pas à la production d'un kg d'olive à huile. L'expression « huile d'olive vierge » qui sera utilisée tout au long de cette évaluation de la durabi-

lité signifiera « huile d'olive vierge ou vierge extra », les deux types d'huile étant complètement indifférenciés au niveau des phases de leur cycle de vie.

10.3 Hypothèses & limites du système

L'étude inclut toutes les infrastructures qui servent directement à la production de l'huile d'olive vierge, à savoir les machines agricoles, les systèmes d'irrigation, le matériel de récolte des olives, les machines pour l'extraction et le stockage de l'huile.

En revanche, des limites ont été posées dans la définition du système. Ainsi, la phase d'utilisation n'est pas prise en compte. Si elle est consommée comme condiment, elle ne présente pas d'impacts environnementaux en tant que tels dans la mesure où elle n'implique aucune consommation d'énergie particulière. Si elle est chauffée pour de la friture, il paraît peu défendable de lui attribuer les impacts liés à la consommation d'énergie nécessaire à la chauffer. En effet, la friture des aliments a pour objectif de frire les aliments et non de chauffer l'huile. Les impacts seraient davantage à attribuer aux aliments frits plutôt qu'à l'huile. Concernant les aspects économiques, ils ne sont pas explicités bien qu'ils apparaissent implicitement dans l'évaluation économique à travers le prix de vente de l'huile finalement assumé par le consommateur. Enfin, les bienfaits avérés de l'huile d'olive sur la santé ne sont pas inclus car quel que soit le système ou le scénario étudié, les bienfaits seront considérés comme identiques. La phase de distribution est simplifiée en considérant que le consommateur vient directement au moulin acheter l'huile d'olive. Ainsi, le transport depuis le moulin jusqu'au lieu de distribution n'est pas modélisé. Le cycle de vie des matières et de l'énergie utilisées à chaque phase est inclus. Sur le plan environnemental, les facteurs d'impacts sont utilisés et sur le plan économique, le prix unitaire fait office de facteur d'impact. En revanche, les aspects sociaux des intrants et des sortants ne sont pas inclus par manque de données disponibles. Le transport des emballages vides depuis le lieu de consommation jusqu'au point de collecte n'est pas inclus car soit le consommateur n'a pas à se déplacer car le ramassage des déchets a lieu aux portes de sa propriété, soit il doit se déplacer pour aller trier ses déchets. Dans ce dernier cas, il se déplacera pour un grand nombre d'emballages. L'allocation qui pourrait être réalisée paraît peu pertinente, d'une part parce qu'elle serait très incertaine, d'autre part parce que les impacts seraient très faibles compte tenu des faibles distances.

Lors de la phase oléicole – probablement l'une des plus complexes à modéliser – le stockage du dioxyde de carbone (CO₂), les émissions d'éléments chimiques issus de la décomposition des matières fertilisantes et les émissions de pesticides constituent des phénomènes clefs sur le plan environnemental. Au niveau des coûts, ces phénomènes constituent par excellence des exemples

d'externalités qu'il faudrait internaliser. Cependant, mis à part le marché du carbone qui pourrait fournir un ordre de grandeur du coût du stockage de carbone, aucun modèle ne semble exister à ce jour qui évaluerait avec fiabilité le coût de dépollution de l'environnement. Sur le plan social, aucune information en termes d'AsCV n'a été trouvée à propos des impacts de ces phénomènes sur la société. L'analyse de la littérature (4.3.2.4 et 4.3.2.5) a mis en lumière l'utilisation dans plusieurs études de modèles chimiques et environnementaux pour estimer les différents flux liés aux trois phénomènes en question. Dans la présente étude, seul les phénomènes d'émission de pesticides dans le sol ont été inclus dans l'étude. La quantité de carbone stocké et les phénomènes liés à la dégradation des fertilisants n'ont pas été comptabilisés.

Chapitre 11. Modélisation du système

La modélisation du système constitue la deuxième étape de l'approche P²E (Figure 43).



Figure 43. Chapitre 11 et approche P²E

De manière générale, le cycle de vie du système de production d'huile d'olive vierge peut être décomposé en sept phases : production des olives, extraction de l'huile, mise en bouteilles, distribution, traitement de l'eau et des margines, traitement des grignons et fin de vie des bouteilles. Un tel découpage se retrouve en partie dans le sous-chapitre 4.2. Dans la présente étude, chaque phase est associée à l'un des deux sous-systèmes qui composent un système agro-industriel (sous-chapitre 7.1.). Dans le contexte de l'huile d'olive, les sous-systèmes en question correspondent au « verger » ou au « moulin ». Chaque sous-système correspond à une entreprise et peut être décomposé en trois sous-sous-systèmes : le système de décision, le système opérant et le système d'information (Figure 28). Le système d'évaluation est supposé comme un système transversal aux deux sous-systèmes « verger » et « moulin ». Il est donc inclus dans le système global. Chaque système, sous-système et sous-sous-système comporte des processus et éventuellement des sous-processus (Espí *et al.*, 2013). À chaque processus ou sous-processus, des flux de matière, d'énergie et de monnaie sont échangés avec l'environnement (au sens social, économique et écologique) et des ressources humaines et informationnelles sont utilisées. Les sections qui suivent décrivent en détail le système de production d'huile d'olive vierge. La figure 44 illustre les processus et sous-processus opérationnels impliqués dans le cycle de vie du produit. Elle montre également les sept phases et les deux systèmes « entreprise » (« verger » et « moulin ») dans lesquels sont rassemblés les processus. Il s'agit d'une vue fonctionnelle sur le système opérant confondu ici avec le système de processus qui définit le produit.

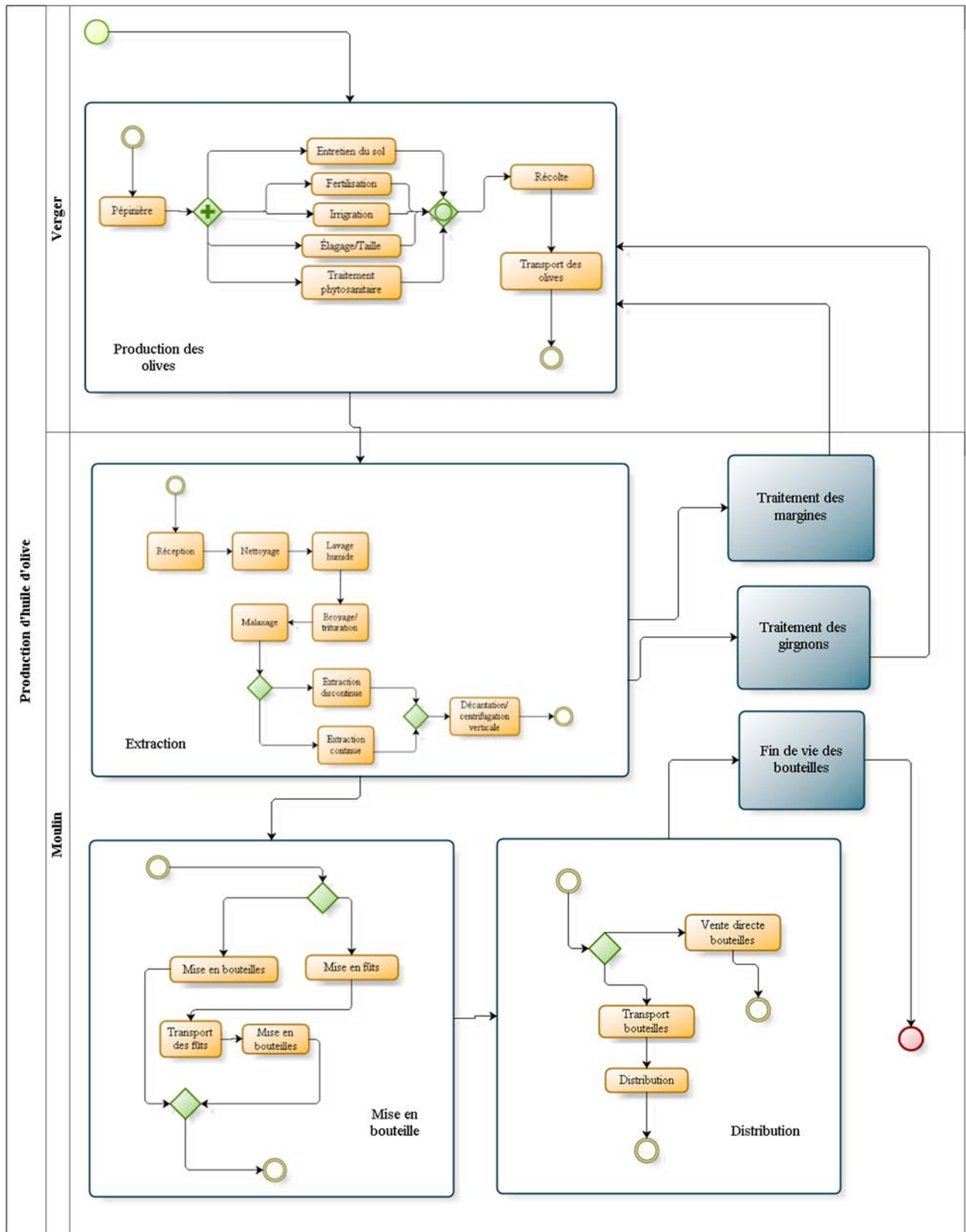


Figure 44. Système global de production d'huile d'olive

Les autres vues sur le système de production d'huile d'olive vierge sont décrites dans les chapitre 6 et 7. Par conséquent, les modèles des sous-systèmes « verger » et « moulin » sont uniquement présentés sous l'angle fonctionnel.

11.1 Sous-système « verger »

Le sous-système « verger » ne contient que la phase de production des olives. Cette dernière reste difficile à modéliser à cause du nombre et de la complexité des phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui ont lieu. Il correspond à la partie « agronomique » du système. Avec 20 000 producteurs d'olives en France pour une surface totale cultivée de 40 000 ha, les pratiques arboricoles varient très largement (Leverge, 2011). Cependant, un certain nombre de processus indispensables sont réalisés par les agriculteurs pour obtenir des olives de qualité en quantité optimale.

11.1.1 Pépinière

La pépinière constitue un processus essentiel de la vie d'un olivier. Aussi est-il important de l'étudier dans la production des olives. Il convient de rappeler qu'elle peut durer un ou deux ans et qu'elle comprend des sous-processus d'irrigation, de fertilisation, de désherbage, de traitements phytosanitaires et d'entretien du sol semblables à ceux appliqués aux oliviers matures.

11.1.2 Entretien du sol

Le labour qui est réalisé traditionnellement dans les plantations d'oliviers consiste fondamentalement en la réalisation des différentes opérations de gestion du sol: le tracé pour la préparation du sol à recevoir les eaux de fin d'hiver et de début de printemps, le binage pour éliminer directement les mauvaises herbes et pour maintenir le sol libre de mauvaises herbes jusqu'à la récolte. Pour la réalisation de tels travaux, des machines très diverses sont employées comme les bras extensibles et rouleaux, la charrue à déversoir, les gradins à disques, le matériel agricole de labour vertical, tels que les cultivateurs ou vibrocultivateurs et enfin les engins auxiliaires comme les tracteurs.

11.1.3 Irrigation

L'irrigation est un des processus les plus importants de la culture. Auparavant, l'irrigation se faisait avec une consommation d'eau très élevée, comme l'irrigation à couverture par inondation ou par aspersion. Actuellement, le procédé le plus étendu et le plus efficace est l'irrigation au goutte à goutte où l'eau est appliquée en petites doses et de manière continue au court du temps.

11.1.4 Fertilisation

Le processus de fertilisation doit se faire à des époques de l'année très précises en accord avec les calendriers traditionnels établis dans chaque pays en fonction du climat caractéristique. En outre, chaque parcelle en fonction de son sol et en fonction du type de culture choisie (biologique ou non/intensive ou non/irriguée ou non) procède à une fertilisation particulière. Parmi les formes d'applications les plus usuelles se détachent l'apport direct au sol à l'aide de machines d'épandage ou à la main, en plus de l'implantation des nouvelles technologies comme l'application foliaire et la fertirrigation.

11.1.5 Traitement phytosanitaire

Le processus de traitement phytosanitaire est divisé en deux sous-processus : le traitement des maladies (causées par des champignons et autres microorganismes) et le traitement des parasites (mouches et autre nuisible). La gestion des agents pathogènes (parasites et maladies) est réalisée à partir de procédés d'application des produits phytosanitaires selon leur état physique : solide, liquide ou gazeux. Il existe le saupoudrage, la fumigation, la pulvérisation et la nébulisation. Les machines de saupoudrage sont employées pour distribuer la formule active sous forme de poudre à travers un courant d'air. Ce courant est créé par un ventilateur et entre dans le dépôt, emportant la poudre et la distribuant de manière plus ou moins homogène sur le végétal. Les fumigateurs expulsent les produits sous forme de gaz et requièrent l'intervention d'un personnel autorisé. Les pulvérisateurs sont constitués d'un dépôt avec des agitateurs qui maintiennent une union intime entre l'eau et le produit et d'une bombonne qui oblige l'eau à sortir à travers des tuyaux, la fragmentant en gouttes de diamètre variable et les dispersant sur le terrain ou sur les plantes. Les nébulisateurs ont un fonctionnement similaire mais ils expulsent le pesticide avec un diamètre de gouttes nettement plus petit.

Comme pour la fertilisation, les pratiques sont multiples car elles dépendent du type de culture choisie. Le Centre Technique de l'Olivier (CTO) a produit un document de synthèse qui rassemble les principales maladies et les principaux parasites de l'olivier ainsi que les traitements à utiliser (CTO, 2011). Ce tableau figure en annexe 2.

11.1.6 Élagage/taille

Le processus d'élagage ou de taille entraîne toute une série d'opérations appliquées aux arbres grâce auxquelles la forme naturelle de l'arbre est modifiée, pour donner plus de vigueur à sa croissance et améliorer ainsi la production nette d'olives. En plus, l'élagage prétend préserver la santé

de l'arbre en maintenant intactes ses fonctions végétatives et reproductrices. Pendant la taille, il est habituel de brûler les branches et les tuteurs. Il s'agit de l'opération du procédé de culture des olives qui présente l'incidence environnementale la plus grande en tant que foyer émetteur de contamination atmosphérique. Il existe trois types de taille: de croissance, de production et de rajeunissement. La première est appliquée lors de la croissance de l'arbre jusqu'à ce qu'il soit prêt à produire les premiers fruits susceptibles d'être utilisés pour la production d'huile d'olive. La taille de production est celle qui se pratique pour maintenir une productivité stable au niveau de la production maximum. Pour finir, la taille de rajeunissement ou de rénovation est réalisée quand la production de l'arbre décroît, approximativement entre 20 et 40 ans, selon la conduite agronomique qui a été faite. Il est important de noter que le bois produit doit être stocké de manière à éviter qu'il soit une niche d'infestation par certains parasites.

11.1.7 Récolte

En fonction de la maturité des olives souhaitée et en fonction de la zone géographique, la récolte des olives s'étend généralement de septembre à février. Il existe de nombreuses techniques de récolte des olives variant selon la destination des olives, de la nature du sol et de la taille de l'exploitation. Ces dernières sont résumées dans le tableau 12.

Tableau 12. Comparaison des différentes techniques de récolte des olives (Veillet, 2010)

Technique/outil	Avantages	Inconvénients	Destination de l'olive
Main	Respectueuse de l'arbre	Fastidieuse et longue	Olives de table
Filets + peigne manuel	Rapide et peu traumatisante pour l'arbre	-	Olives à huile
Filet + peigne mécanique (ou vibreur de branche)	Méthode rapide et peu traumatisante pour l'arbre	-	Olives à huile
Vibreux de tronc	Méthode rapide	Coût élevé et dégâts non négligeables sur les jeunes oliviers	Olives à huile

Après la récolte, les olives sont transportées au moulin où elles vont subir diverses opérations jusqu'à l'obtention de l'huile.

11.2 Sous-système « moulin »

Le sous-système « moulin » contient les phases d'extraction de l'huile, de mise en bouteilles, de distribution, de traitement de l'eau et des margines, de traitement des grignons et de fin de vie des

bouteilles. Il correspond à la partie « industrielle » du cycle de vie. La phase de fin de vie des bouteilles ne fait pas directement partie de l'entreprise que représente le sous-système « moulin ». Elle correspond davantage au sous-système « produit » en tant que phase du cycle de vie de l'huile d'olive vierge. Toutefois, elle a été intégrée au sous-système « moulin » pour simplifier la présentation des résultats et dans le but d'élargir la responsabilité de l'entreprise. Cette partie présente les processus qui composent le sous-système « moulin ».

11.2.1 Extraction de l'huile

La phase d'extraction de l'huile est composée de plusieurs processus. Elle correspond au modèle de procédé d'extraction de l'huile vierge illustré dans les figures 45 et 46.

Le processus de réception des olives consiste à stocker temporairement les pallox (grandes caisses en polyéthylène haute densité (PEHD) qui contiennent environ 400 kg d'olives). Les lignes de réception comprennent habituellement une trémie souterraine qui comprend une grille dans la partie supérieure par où les camions transitent et où se déversent les olives à travers les différents orifices. Une fois déposées, les olives se déplacent vers la zone de procédé sur des tapis roulants ou des chariots élévateurs pour son nettoyage et son lavage

Le nettoyage des olives est nécessaire pour séparer les produits impropres issus de la récolte tels que des restes de feuilles, de branches, de sable ou de pierres. S'il n'est pas réalisé correctement, ces restes peuvent diminuer le rendement de l'huile, altérer ses propriétés organoleptiques à travers une altération de la couleur, une augmentation de l'amertume et des aspérités. Les équipements habituellement utilisés sont les nettoyeurs et les séparateurs. Les nettoyeurs sont chargés de séparer les matériels impropres moins lourds à travers un courant d'air. Quant aux séparateurs, ils éliminent les branches et brindilles plus pesantes et les évacuent grâce à un système de vis sans fin.

Après le nettoyage qui mène à la séparation des restes liés à la récolte des olives, ces dernières sont soumises à un lavage humide. À cet effet, les olives passent habituellement dans une laveuse dans laquelle un bain à bulles élimine les impuretés et corps étrangers que les olives ont pu apporter avec elles. Il existe également des équipements qui utilisent un système d'immersion/flottaison. À chaque fois que les olives sont lavées, elles sont stockées avant d'être dirigées vers les procédés d'extraction.

Le processus de trituration permet de broyer les olives afin de les préparer à libérer l'huile qu'elles contiennent. Actuellement, deux familles de broyeurs sont le plus couramment utilisées :

les broyeurs à meules et les broyeurs métalliques (à marteaux, à couteaux ou à dents). Chaque technique utilise une certaine source d'énergie telle que l'électricité, la force hydraulique ou éolienne. Les moulins étudiés n'ont recours qu'à l'énergie électrique pour la trituration. Après la trituration, une pâte hétérogène est obtenue. Un procédé de dénoyautage peut précéder la trituration. Les études semblent diverger quant aux bienfaits de cette option sur la qualité de l'huile (Veillet, 2010).

Le processus de malaxage consiste en un mouvement lent et continu de la pâte à travers une série de rotors, pales et couteaux disposés en série et de manière horizontale. Avec ce système, les tissus de la pulpe se rompent en libérant d'un côté l'eau de végétation et de l'autre, une phase oléique homogène qui facilite à chaque fois la séparation de l'huile au cours des processus d'extraction suivants. Des thermomalaxeurs sont généralement utilisés. La masse d'olives se réchauffe à travers une enveloppe chauffante qui entoure le corps du malaxeur en le maintenant à une température constante de 35 °C. Avec ce type de malaxeur, la fluidification de la masse d'olives est obtenue et améliore l'extractabilité de la pâte. Occasionnellement, pour prévenir la formation d'émulsions qui rendent difficile la séparation ultérieure de l'huile, du talc en poudre très fine est ajouté. Il s'agit d'un co-adjuvant qui améliore la structure interne des pâtes difficiles et augmente le rendement de séparation. D'autres co-adjuvants tels que les enzymes protéolytiques peuvent également être utilisées. Dans les moulins étudiés, aucun co-adjuvant n'est utilisé. C'est à ce moment du procédé que la température de la pâte doit être surveillée au plus près et ne pas dépasser 27 °C pour porter la mention « extraite à froid ». Après le processus de malaxage, l'extraction de l'huile est réalisée soit de manière discontinue, soit de manière continue.

Le pressage est une méthode traditionnelle qui consiste à extraire par pression la phase liquide (eau de végétation et huile) de la phase solide (grignons pâteux). Il se réalise de manière discontinue et comprend trois sous-processus: la formation de la charge, le pressage et l'évacuation. Au cours du premier sous-processus, la pâte solide issue du malaxage est étendue en fines couches sur les disques de matériel filtrant appelés les scourtins. Ces scourtins sont empilés les uns sur les autres sur un wagonnet guidé par un aiguillage central. L'ensemble formé par le wagonnet, l'aiguillage et les scourtins s'appelle une charge et peut atteindre deux mètres de haut. Une fois la charge formée, elle est soumise à une pression produite par une presse hydraulique. La phase liquide est ainsi obtenue et s'écoule sur le wagonnet. Quand le sous-processus de pressage est terminé, la phase solide qui forme les grignons pâteux est séparée de la phase liquide et évacuée. Finalement, la phase liquide est dirigée vers le processus de séparation des phases aqueuse et oléique. Le modèle de procédé discontinu d'extraction de l'huile est présenté dans la figure 45.

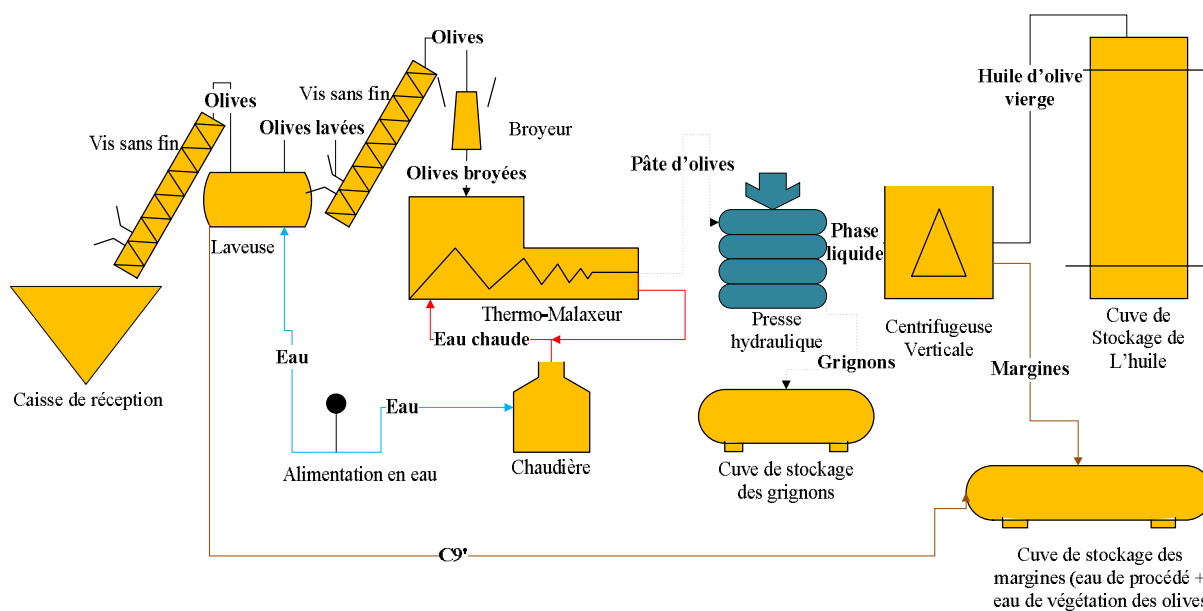


Figure 45. Procédé discontinu d'extraction

Les procédés continus d'extraction présentent l'avantage d'être plus rapides et d'offrir un meilleur rendement d'extraction que le procédé d'extraction discontinue. La séparation des phases solide et liquide issues du malaxage des olives a lieu dans un décanteur. Si une certaine quantité d'eau est ajoutée, le mélange se sépare en trois phases : solide (grignons pâteux), aqueuse et oléique. En revanche, s'il n'est pas nécessaire d'ajouter d'eau grâce à la conception du décanteur, seul deux phases sont obtenues: les grignons pâteux avec une teneur en eau importante et la phase liquide/oléique. Le décanteur est un dispositif qui consiste en un rotor cylindro-conique et un grattoir hélicoïdal à axe creux qui tourne coaxialement à l'intérieur. La différence de vitesse et les différentes densités des composés du mélange de charge aboutissent à la séparation des phases distinctes. Les solides s'adossent à la paroi intérieure du rotor et sont entraînés vers une extrémité par une vis sans fin. En ce qui concerne la phase liquide, elle forme des anneaux concentriques intérieurs selon la densité et sort à l'extérieur par différents conduits. Le modèle de procédé continu d'extraction de l'huile est présenté dans la figure 46.

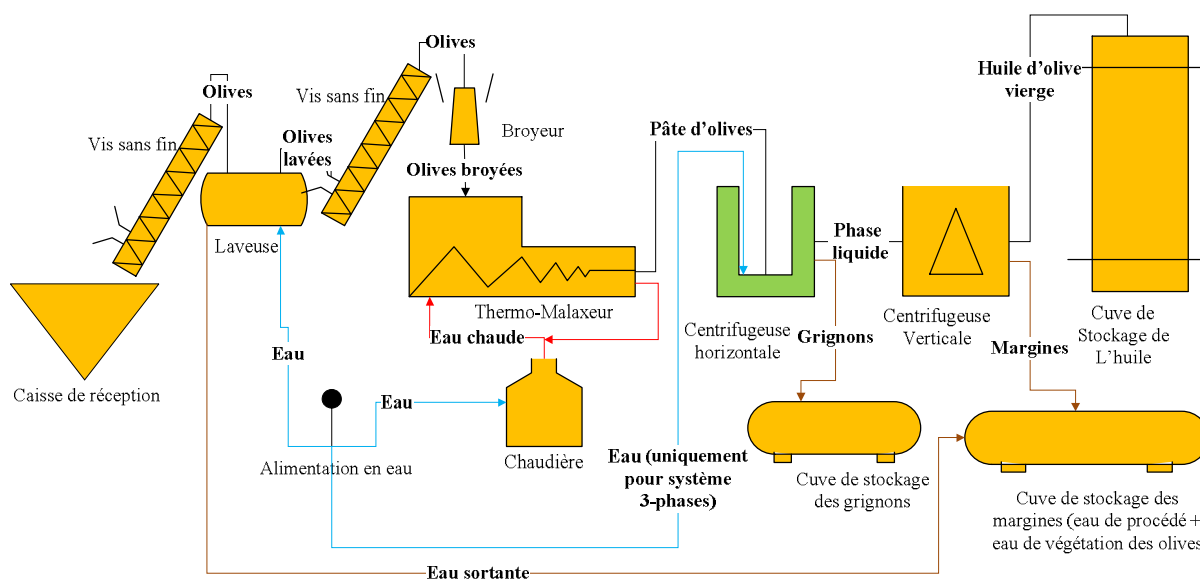


Figure 46. Procédé continu d'extraction

Malgré les avantages évoqués pour un système continu d'extraction avec centrifugation, le procédé à trois phases comporte également des inconvénients. Tout d'abord, le système nécessite la consommation d'eau et d'énergie thermique pour assurer une bonne séparation. De surcroît, l'apport important en eau et en chaleur appauvrit l'huile en composés aromatiques et phénoliques, diminuant alors sa résistance à l'oxydation. Par ailleurs, l'humidité élevée des grignons (45 à 55 %) et la génération importante de margines pose le problème de leur valorisation.

Le système de décantation à deux phases va régler une majeure partie des problèmes soulevés par l'extraction à trois phases. Ainsi, il ne nécessite pas d'ajout d'eau pour la séparation huile/solides, permet l'obtention d'huiles plus stables au niveau de l'oxydation, économise la fraction d'huile qui était perdue avec les margines et donc possède un rendement légèrement meilleur que le décanteur à trois phases (de 84.5 % pour la presse à 85.5 % pour les trois phases et 86.1 % pour les deux phases). Ne pas ajouter d'eau limite la génération des déchets, notamment des margines. Ainsi, seul des grignons sortent de ce procédé, mais avec une humidité plus importante que ceux du procédé à trois phases, ce qui impose de les sécher en cas de valorisation thermique.

Il existe le procédé intermédiaire à deux phases et demie. Ce dernier système, le plus récent, est en réalité une sorte de mélange entre les deux méthodes précédentes. En effet, l'utilisation d'une faible quantité d'eau permet de séparer l'huile, les grignons humides et les margines. Ces dernières sont ainsi produites en petite quantité, limitant ainsi leur effet polluant.

Après l'extraction, le mélange huile-eau issu de l'extraction subit une décantation soit par gravitation, soit par centrifugation verticale. Néanmoins, la majorité des moulins français actuels utilise

la deuxième option car d'une part elle permet de rompre l'émulsion huile-eau facilitant alors la séparation et d'autre part elle s'intègre parfaitement à un système d'extraction continue. L'inconvénient majeur de la centrifugation réside dans la perte de tradition qui peut nuire à la publicité du produit.

11.2.2 Stockage & mise en bouteilles

L'huile d'olive vierge est stockée et conditionnée dans des contenants très variés en taille et en composition. En effet, comme présenté dans la section 4.2.5, les fûts de stockage et les bouteilles d'huile d'olive vierge présentent un volume qui peut varier de 5 mL à plusieurs milliers de litres. Ils sont composés de verre, d'acier inoxydable, de polypropylène, de polyéthylène téréphtalates, de fer blanc.

11.2.3 Traitement des grignons, margines et eaux résiduelles

Le devenir des grignons, margines et eaux résiduelles se compose de multiples options présentées dans la sous-section 4.2.7.2.

11.2.4 Fin de vie des bouteilles

La fin de vie des bouteilles suit les trois voies possibles en France, à savoir le recyclage, l'enfouissement ou l'incinération.

11.3 Scénarios

Dans le but de comparer différentes pratiques dans les vergers et dans les moulins, des scénarios types ont été élaborés pour chacun des deux sous-systèmes « verger » et « moulin ».

11.3.1 Scénarios pour le sous-système « verger »

Sur la base des différentes options possibles qui caractérisent les pratiques agricoles présentées en section 4.2.1, différents scénarios ont été construits. Avant de présenter les scénarios étudiés, il convient de rappeler que les options les plus importantes sont l'irrigation (avec ou sans), le type de culture (biologique ou conventionnel) et l'intensité de la culture (marginale, traditionnelle, intensive ou superintensive). À ces options peut être ajouté le niveau de mécanisation. Ce dernier dépend essentiellement de la topographie caractérisée par l'altitude, le relief et l'accessibilité. Au cours de ce travail, quatre niveaux de mécanisation ont été identifiés par Sébastien Leverage, expert du Centre Technique de l'Olivier : (i) nul à faible qui correspond à une faible surface et peu de

machines (motoculteur, débroussailleuse, pulvérisateur à dos, peigne électrique) ; (ii) moyen qui correspond au précédent avec en plus un tracteur pour le pulvérisateur, le labour et le désherbage ; (iii) forte qui correspond à un pulvérisateur plus grand que le précédent degré et un vibreur à main porté et enfin (iv) total avec vibreur de tronc.

À partir des douze cas d'étude obtenus lors de la collecte des informations concernant des oléiculteurs, six scénarios ont pu être construits. Afin de déterminer des scénarios moyens, l'irrigation, le type de culture et l'intensité de la culture ont servi pour l'identification des scénarios. Le niveau de mécanisation a été écarté de la construction des scénarios car il semble corrélé à l'intensité de la culture. Le tableau 13 présente les scénarios oléicoles évalués.

Tableau 13. Scénarios des pratiques oléicoles

	Nom des Scénarios*					
	Conv-Ir-Trad	Conv-Sec-Trad	Conv-Ir-Int	Conv-Sec-Int	Bio-Sec-Trad	Bio-Ir-SuperInt
Irrigation	Irriguée	Non-irriguée	Irriguée	Non-irriguée	Irriguée	Non-irriguée
Type de culture	Conventionnelle	Conventionnelle	Conventionnelle	Conventionnelle	Biologique	Biologique
Intensité de la culture	Traditionnelle	Traditionnelle	Intensive	Intensive	Traditionnelle	Superintensive
Nombre d'entreprises par scénario	6	2	1	1	1	1

*Conv = conventionnel, Trad = traditionnelle, Ir = avec irrigation, Sec = sans irrigation, Int = intensive, Bio = biologique et SuperInt = Superintensive.

Le scénario de culture conventionnelle, irriguée et traditionnelle (« Conv-Ir-Trad ») constitue l'itinéraire cultural le plus répandu dans les faits comme dans les cas d'étude utilisés. Sur une base statistique, il se présente comme le scénario le plus robuste grâce à la taille de l'échantillon. Outre ces scénarios, un scénario moyen de production des olives correspondant à la moyenne de tous les vergers étudiés a été élaboré.

11.3.2 Scénarios pour le sous-système « moulin »

Les options technologiques d'extraction de l'huile sont a priori moins nombreuses que pour la culture des olives. Le processus caractérisant le plus cette phase industrielle du cycle de vie est l'extraction de l'huile qui, pour rappel, est réalisée selon une option technologique parmi les suivantes : presse, système 2-phases ou système 3-phases. Le tableau 14 montre le nombre d'entreprises participantes par type de technologie.

Tableau 14. Scénarios d'extraction d'huile

Scénario	Presse	Système 2-phases	Système 3-phases
Nombre d'entreprises par scénario	1	7	1

Outre ces trois scénarios, un scénario moyen d'extraction de l'huile correspondant à la moyenne de tous les moulins étudiés a été élaboré.

Ensuite, différentes options existent pour les processus de traitement des grignons, margines ou eaux résiduelles. Cependant, pour éviter la complexification des combinaisons de scénarios et comme les données relatives à ces processus ont manqué, ces options n'ont pas été utilisées dans la construction de scénarios. Il en est de même pour les options de mise en bouteille ainsi que pour les options de fin de vie des bouteilles. Ainsi, les scénarios moyens de traitement des grignons, margines ou eaux résiduelles, ceux de mise en bouteille et ceux de fin de vie des bouteilles ont été construits en suivant les scénarios d'extraction.

Concernant la fin de vie des bouteilles, un scénario moyen par type d'emballage a été construit (Tableau 15). Chaque scénario établit une proportion entre les trois options de fin de vie possible : enfouissement technique, incinération et recyclage. Les proportions sont issues de statistiques nationales.

Tableau 15. Scénarios de fin de vie des bouteilles

Scénario de fin de vie (Ademe, 2013)	Recyclage	Enfouissement	Incinération	Total
Verre	68,1 %	31,9 %	0 %	100 %
Métal	63,3 %	35,7 %	0 %	100 %
Plastique	25 %	41,9 %	33,1 %	100 %

Au regard de l'analyse des études d'ACV de l'huile d'olive dans la littérature, les options étudiées dans la présente étude couvre un spectre très large. Aucune étude ne semble avoir testé autant d'options (Tableau 16).

Tableau 16. Scénarios analysés dans la bibliographie

Auteurs	Verger	Moulin				
	Production des olives ¹	Extraction de l'huile ²	Mise en bouteille ³	Gestion des grignons ⁴	Gestion des eaux résiduelles ⁵	Fin de vie des bouteilles ⁶
(Nicoletti <i>et al.</i> , 2001) (Notarnicola <i>et al.</i> , 2004)	? Conv; Bio Ir	? Continu pour Conv; P pour Bio	? -	? -	? -	? -
(Georgiou <i>et al.</i> , 2006) (Cortes, 2006)	Nur; Conv; Ir Nur; Conv; Ir	2; 3 2; Po	-	Inc Inc	Dry Sp; MD	-
(Avraamides et Fatta, 2006)	Nur; Conv; Ir	3	-	Inc	Dry	-
(Olivieri <i>et al.</i> , 2005) (Olivieri <i>et al.</i> , 2007)	Conv; Bio Ir -	- ?	- ?	- Sp	- Sp	- -
(Avraamides et Fatta, 2008) (De Gennaro <i>et al.</i> , 2012)	Système moyen Int; SuperInt; Ir	3 -	-	-	-	-
(Salomone et Ioppolo, 2012) (Guzman et Alonso, 2008)	Conv; Bio Ir; Sec; Conv; Bio Ir; Sec	P; 3; 2; PO -	-	Comp -	Sp; Comp -	-
(Kaltsas <i>et al.</i> , 2007) (Recchia <i>et al.</i> , 2011)	Conv; Bio Ir Mar; Trad; Int; SuperInt; Ir; Sec; Conv; Bio Ir	- 2P -	-	-	-	-
(Michalopoulos <i>et al.</i> , 2011)(EPD, 2012a) (Dessane, 2003) (EPD, 2012b) (Fiore <i>et al.</i> , 2009) (Neri, 2006)	Conv; Bio Ir Conv; Ir Int; Ir Int; Conv; Bio Ir	2; 3 - 3 2 2	Gl - Gl Gl ?	Sp - - Sp -	Sp - - - -	- - Recy Recyc -

¹ Conv = culture conventionnelle, Bio = culture biologique, Ir = culture irrigué, Sec = culture non irrigué, Trad = culture traditionnelle, Mar = culture marginale, Int = culture intensive, SuperInt = culture super intensive, Nur = pépinière ;

² P = presse, 2 = système 2-phase, 3 = système 3-phase, Po = extraction de l'huile de grignons,

³ Gl = verre ;

⁴ Sp = épandage, Inc = incinération, Comp = compostage, CoGe = cogénération ;

⁵ Sp = épandage, Dry = séchage en étang, MD = tout-à-l'égout ;

⁶ Recy = recyclage, Inc = incinération, LF = enfouissement.

11.3.3 Scénarios pour le système de production d'huile d'olive

Avec six scénarios oléicoles et trois scénarios industriels, dix-huit scénarios pour le système de production d'huile d'olive peuvent ainsi être étudiés (Tableau 17).

Tableau 17. Scénarios du système de production d'huile d'olive vierge

Sigle du scénario	Irrigation	Type de culture	Intensité de la culture	Technologie d'extraction
PCIT	Oui	Conventionnelle	Traditionnelle	Presse
2CIT	Oui	Conventionnelle	Traditionnelle	Système 2-phases
3CIT	Oui	Conventionnelle	Traditionnelle	Système 3-phases
PCST	Non	Conventionnelle	Traditionnelle	Presse
2CST	Non	Conventionnelle	Traditionnelle	Système 2-phases
3CST	Non	Conventionnelle	Traditionnelle	Système 3-phases
PCII	Oui	Conventionnelle	Intensive	Presse
2CII	Oui	Conventionnelle	Intensive	Système 2-phases
3CII	Oui	Conventionnelle	Intensive	Système 3-phases
PCSI	Non	Conventionnelle	Intensive	Presse
2CSI	Non	Conventionnelle	Intensive	Système 2-phases
3CSI	Non	Conventionnelle	Intensive	Système 3-phases
PBST	Non	Biologique	Traditionnelle	Presse
2BST	Non	Biologique	Traditionnelle	Système 2-phases
3BST	Non	Biologique	Traditionnelle	Système 3-phases
PBIS	Oui	Biologique	Superintensive	Presse
2BIS	Oui	Biologique	Superintensive	Système 2-phases
3BIS	Oui	Biologique	Superintensive	Système 3-phases

Outre ces dix-huit scénarios, un scénario moyen est construit par agrégation du scénario moyen de production des olives (moyenne des 12 vergers étudiés) et du scénario moyen d'extraction de l'huile (moyenne des 9 étudiés). Ce scénario moyen élaboré est fictif dans la mesure où il comprend toutes les options techniques possibles. Chacune des technologies participe proportionnellement à son occurrence à travers les cas étudiés. Par exemple, si un moulin parmi les neuf utilise la presse, la technologie de la presse participera à hauteur d'un neuvième au scénario moyen. Un tel scénario permet de tester la sensibilité du modèle du système à certains paramètres.

Chapitre 12. Inventaire des données

L'étape d'inventaire des données est cruciale. Elle correspond à la troisième étape de l'approche P²E (Figure 47) et comporte quatre sous-étapes successives. La première correspond à la récolte des données brutes. Ces données brutes concernent le procédé, le produit et l'entreprise et couvrent ainsi les volets environnementaux, économiques et sociaux. La deuxième sous-étape se focalise sur la simulation du procédé. La troisième est orientée vers le produit et reprend les informations issues des deux autres pour exprimer les flux de matière et d'énergie par unité fonctionnelle. Finalement, dans le but de vérifier la robustesse de l'application vis-à-vis des données utilisées, une analyse de leur qualité est réalisée qui mène au calcul d'une incertitude globale moyenne sur les données d'entrée (présenté dans la section 7.2.4).

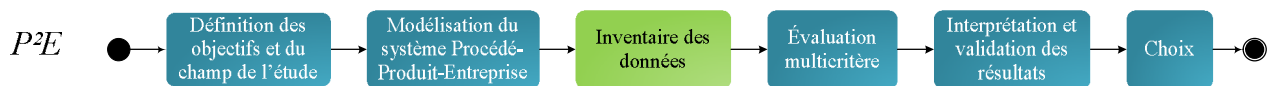


Figure 47. Chapitre 12 et approche P²E

Les données brutes économiques et sociales qui caractérisent le système au niveau entreprise sont simplement récoltées mais ne subissent pas de transformation au niveau de l'inventaire des données. Il convient de rappeler ici que la typologie des données est explicitée dans l'ontologie (section 6.5.3).

12.1 Récolte des données brutes

La récolte des données brutes consiste à contacter les professionnels du secteur pour leur soumettre un questionnaire complet afin qu'il le remplisse avec les informations générales, environnementales, économiques et sociales qui les concernent. Les questionnaires sont ensuite traités puis complétés si besoin par des données d'expert ou tirées de la littérature. Dans le cadre de la présente étude, nous avons rencontré les mouliniers grâce auxquels nous avons pu remplir les questionnaires d'inventaire. Ces questionnaires comportaient les informations environnementales, sociales et économiques ainsi que des informations technologiques. Les questionnaires utilisés figurent en annexes 5 et 6.

12.1.1 Données brutes pour le sous-système « verger »

Les données concernant la culture des olives ont été récoltées avec l'aide du Centre Technique de l'Olivier (CTO). Elles proviennent de huit agriculteurs différents dont un fournit deux types de cultures et un autre en fournit trois. C'est ainsi que onze cas d'étude ont été obtenus pour la culture des olives. À ces onze cas particuliers se rajoute le cas moyen de la culture biologique intensive. Ce dernier a été calculé à partir des données de quatorze producteurs qui se partagent 500 ha. Le choix des producteurs a été orienté par les trois options retenues pour construire les scénarios. Sur la figure 48 sont rassemblées et comparées les statistiques nationales des différentes options avec les statistiques des cas étudiés. Faute d'information quant à la situation française, les données relatives à la pépinière proviennent d'un pépiniériste portugais. Afin de tenir compte de la différence géographique, les données de cette phase du cycle de vie reçoivent un score de qualité moins bon que pour les données françaises.

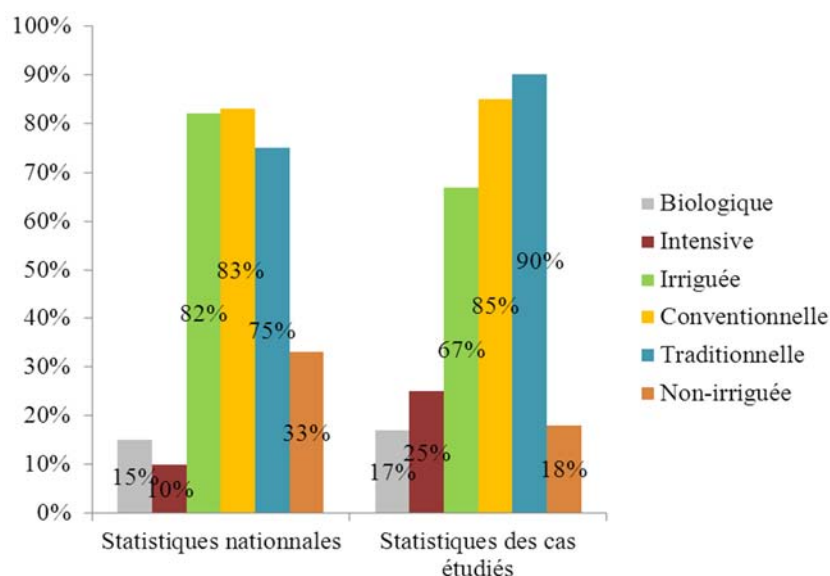


Figure 48. Statistiques sur les pratiques culturales oléicoles en France (Leverge, 2011)

Sur la figure 48, une convergence apparaît dans les statistiques relatives aux options sélectionnées. Le tableau 18 présente les caractéristiques des entreprises de production d'olives étudiées.

Tableau 18. Caractéristiques des entreprises de production d'olives

Entreprise	Biologique	Traditionnel	Intensif	Niveau de mécanisation	Irrigation	Superficie (en ha)	Teneur en huile (% mas-sique)	Quantité d'olives (en kg/ha)	Département	Arbres (arbres/ha)	Variété d'olives
1	non	oui	non	1	oui	2,5	20,2	650	06	100	AOC Nice
2	non	oui	non	2	oui	4,5	22,2	1240	06	900	AOC Nice
3	non	oui	non	2	oui	1,15	19,1	2700	84	285	AOC Nice (1/4) Aglandau (4/5)
4	non	oui	non	2	non	1,71	19,7	2340	84	285	Aglandau
5	non	oui	oui	3	oui	15	18,9	5250	04	380	Aglandau
6	non	oui	oui	3	non	0,4	18,9	1900	04	330	Aglandau
7	non	oui	non	3	oui	20	18,9	4000	04	250	Aglandau ; AOC Provence
8	oui	oui	non	2	non	15	19,8	1550	07	200	Rougette
9	non	oui	non	3	non	5	16,8	1780	07	220	Rougette (1/3) ; Aglandau (2/3)
10	non	oui	non	3-4	oui	6	18,0	4500	30	285	Picholine AOC Nîmes (2/3) ; Verdale de l'Hérault (1/6) ; Negrette AOC Nîmes (1/6)
11	non	oui	non	4	oui	5	23,4	4300	26	287	Tanche AOC Nyons
12	oui	non	oui	4	oui	35,7*	17,5	4300	-	1600	Arbequine (1/3) Arboussane (1/4) Koroneiki (1/10)

De ce tableau ressort l'hétérogénéité des cas d'étude. En effet, le rendement en olives peut varier entre 650 kg et 4300 kg par hectare. Même si la densité d'oliviers semble majoritairement se situer autour de 300 arbres par hectare, elle s'étend de cent arbres par hectare à 1600 arbres par hectare dans le cas de la production superintensive. Il convient de remarquer que la variété d'olive est également très variable.

12.1.2 Données brutes pour le sous-système « moulin »

Les données concernant les phases d'extraction de l'huile, de traitement des grignons, de traitement de l'eau, de mise en bouteilles et de transports ont été obtenues auprès de dix moulins différents. Après traitement des données fournies, certains questionnaires ou certains renseignements fournis par les mouliniers n'étaient pas complets, donnant lieu à un questionnaire supplémentaire sans retour ce qui a conduit à l'invalidation du cas. Ainsi, parmi les 10 mouliniers interrogés, un

n'a pas été retenu faute de données exploitables. Avec un total de 9 moulins sur 243, l'échantillon évalué représente 3,7%. Le tableau 19 récapitule l'ensemble des questionnaires par phase qui ont été finalement retenus.

Tableau 19. Questionnaires retenus pour les calculs d'inventaire concernant les moulins

Phase	Volets environnemental et économique					Volet social
	Extraction	Traitement des grignons	Traitement de l'eau	Mise en bouteilles	Transport	Toutes les phases
Échantillon	9	9	2	7	9	2

Afin d'évaluer la représentativité des données utilisées, les figures 49 et 50 montrent la comparaison entre la répartition des cas d'étude et la répartition nationale pour ce qui concerne les techniques d'extraction et de traitement des grignons utilisées.

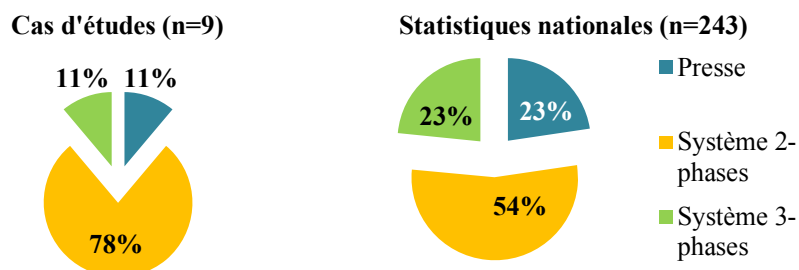


Figure 49. Comparaison entre la répartition des cas d'étude et celle de l'ensemble des moulins de France en fonction de la technique d'extraction de l'huile utilisée

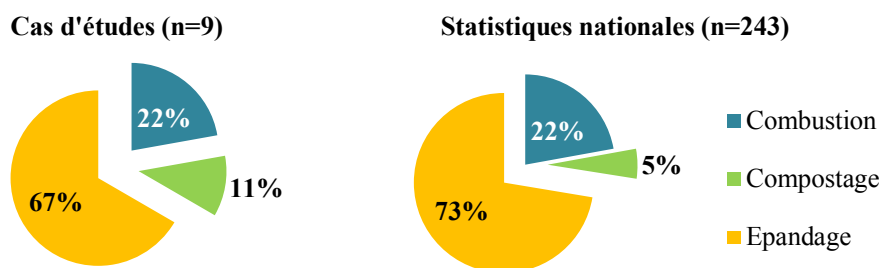


Figure 50. Comparaison entre la répartition des cas d'étude et celle de l'ensemble des moulins de France en fonction de la technique de traitement des grignons utilisée.

La répartition des cas d'étude s'avère fidèle à quelques pourcents près à la répartition nationale. Ainsi, les scénarios élaborés peuvent être considérés comme représentatifs de la situation natio-

nale. Le tableau 20 présente les valeurs moyennes des données brutes qui caractérisent le scénario moyen. La liste détaillée des données brutes des vergers et des moulins est fournie en annexes 7 et 8.

Tableau 20. Données saisies qui définissent le scénario moyen

Données	Unité	Vergers*	Moulin*
Durée de la pépinière	années	1	n.c.
Durée de vie du système de production	années	50	50
Durée de vie infrastructure	années	50	50
Distance de du consommateur au lieu de vente	km	n.c.	15
Quantité d'huile transportée par le consommateur	L	n.c.	4
Matière Grasse des olives	% en masse	n.c.	23,5%
Matière Sèche des olives	% en masse	n.c.	30,4%
Eau des olives	% en masse	n.c.	46,1%
Quantité d'olive traitées	t/an	27,3	27,3
Quantité d'eau de procédé utilisée	m ³ /an	n.c.	21
Volume d'huile extraite par 100 kg d'olives traitées	L/100 kg	18,1	18,1
Surface cultivée correspondante	ha	9,33	9,33
Taux d'imposition	sans unité	0,33	0,33
Taux d'actualisation	sans unité	0,1	0,1
Valeur de l'emprunt (€)	€	9000	90000
Période de l'emprunt (années)	années	10	10
Taux d'intérêt	sans unité	0,1	0,1
Total recettes	€	78591,2	325760
Total dépenses	€	24181,7	122391
Total investissement	€	116950,8	554247
Nombre d'accidents fatals par an	#/an	0	0
Mesure de prévention des risques du travail	sans unité	oui	oui
Protocole d'urgence en cas de blessures ou d'accident	sans unité	oui	oui
Protocole d'urgence en cas d'exposition à des produits chimiques dangereux (pesticides)	sans unité	oui	non
Présence et utilisation d'équipement de protection dans les situations qui le nécessitent	sans unité	oui	oui
Nombre d'emploi temps plein	#	1	2
Estimation de la qualité et nombre d'informations disponibles concernant les propriétés nutritives et organoleptiques du produit	sans unité	Suffisant	Suffisant
Nombre de plaintes ou de mécontentements concernant le produit vendu	#	0	0
Pourcentage de travailleurs locaux	%	100	100
Employés avec un haut niveau d'étude	%	100	50
Certifications	sans unité	ISO 9001	aucune

*n.c. = non concerné

12.2 Simulation du procédé d'extraction

La simulation est considérée comme une étape de l'inventaire des données dans la mesure où elle aboutit à des données simulées de flux de matière et d'énergie qui seront réutilisés dans l'AeCV et

l'AcCV. La simulation du procédé d'extraction repose sur un modèle de bilan matière dont l'objectif consiste à déterminer les sortants du procédé et leur composition en fonction des intrants et de leur composition. Le système à résoudre comporte cinq équations (de l'Équation 5 à l'Équation 9 incluses). À partir de la composition en matière grasse, en eau et en matière sèche des olives en entrée de procédé, de la quantité d'eau utilisée et de l'efficacité du procédé, la quantité d'huile, de grignons et d'eau en sortie sont calculées ainsi que leur teneur en matière grasse, matière sèche et eau. Le bilan matière est réalisé pour les trois différents procédés d'extraction (presse, système 2-phases et système 3-phases). Les équations du système à résoudre sont présentées dans les sections suivantes. La simulation du procédé est mise en œuvre dans &cOlive.

12.2.1 Fractions massiques des composants des grignons

La première équation du système régit les différents composants des grignons. La somme des pourcentages massiques des trois composants (matière grasse, matière sèche et eau) présents dans les grignons doit être égale à l'unité (Équation 4).

$$\omega_{MG}^{Grignons} + \omega_{MS}^{Grignons} + \omega_{eau}^{Grignons} = 1$$

Équation 4. Conservation de la masse dans les grignons

$\omega_{MG}^{grignons}$ est la fraction massique de la matière grasse des grignons, $\omega_{MS}^{grignons}$ est la fraction massique de la matière sèche des grignons et $\omega_{eau}^{grignons}$ est la fraction massique de l'eau contenue dans les grignons. Comme le Solveur Excel fonctionne de manière optimale pour annuler une équation. Ainsi, dans l'outil &cOlive, l'équation implémentée correspond à l'Équation 5.

$$\omega_{MG}^{Grignons} + \omega_{MS}^{Grignons} + \omega_{eau}^{Grignons} - 1 = 0$$

Équation 5. Conservation de la masse dans les grignons dans &cOlive

Afin d'adapter le système d'équations au Solveur, toutes les équations qui suivent sont présentées de manière à faire apparaître une somme qui s'annule.

12.2.2 Fractions massiques des composants des margines

À l'instar des pourcentages massiques présents dans les grignons, les fractions massiques des différents composants des margines vérifient l'Équation 6.

$$\omega_{MG}^{Margines} + \omega_{MS}^{Margines} + \omega_{eau}^{Margines} - 1 = 0$$

Équation 6. Somme des fractions massiques dans les margines

$\omega_{MG}^{margines}$ est la fraction massique de la matière grasse des margines, $\omega_{MS}^{margines}$ est la fraction massique de la matière sèche des margines et $\omega_{eau}^{margines}$ est la fraction massique de l'eau contenue dans les margines.

12.2.3 Débits d'eau

La conservation de la masse impose que la somme des débits d'eau en entrée de procédé soit égale la somme des débits d'eau en sortie. Outre l'eau ajoutée au procédé pour les diverses opérations, il faut tenir compte de l'eau contenue dans les olives. En sortie du procédé, l'eau se retrouvera dans les grignons humides, les margines et l'eau de sortie. L'huile extraite lors du procédé n'est composée que de matière grasse, c'est-à-dire sans eau ni matière sèche. L'Équation 8 régit la conservation de l'eau.

$$\omega_{eau}^{Olives} \times W^{Olives} + W^{Eau_ajoutée} - \omega_{eau}^{Grignons} \times W^{Grignons} - \omega_{eau}^{Margines} \times W^{Margines} - W^{Eausortant} = 0$$

Équation 7. Conservation de l'eau

ω_{eau}^{olives} , $\omega_{eau}^{margines}$ et $\omega_{eau}^{grignons}$ sont les fractions massiques de l'eau contenue respectivement dans les olives, les margines et les grignons, W^{Olives} , $W^{Eau_ajoutée}$, $W^{Grignons}$, $W^{Margines}$ et $W^{Eau_sortant}$ correspondent aux quantités respectives d'olives traitées, d'eau ajoutée, de grignons produits, de margines produites et d'eau en sortie de procédé.

12.2.4 Débits de matière sèche

Comme pour les débits d'eau, les débits de matière sèche vérifient la conservation de la masse (Équation 8). Comme aucun changement d'état n'a lieu ni aucune réaction chimique, toute la matière sèche entrante se retrouve en sortie.

$$\omega_{MS}^{Olives} \times W^{Olives} - \omega_{MS}^{Grignons} \times W^{Grignons} - \omega_{MS}^{Margines} \times W^{Margines} = 0$$

Équation 8. Conservation de la matière sèche

ω_{MS}^{olives} , $\omega_{MS}^{margines}$ et $\omega_{MS}^{grignons}$ sont les fractions massiques de matière sèche contenue respectivement dans les olives, les margines et les grignons, W^{Olives} , $W^{Eau_ajoutée}$, $W^{Grignons}$, $W^{Margines}$ et W^{Eau}

sortant correspondent aux quantités respectives d'olives traitées, de grignons produits et de margines produites.

12.2.5 Débits de matière grasse

La dernière équation du système ressemble à l'Équation 8 mais pour les débits de matière grasse (Équation 9), il faut considérer le courant de sortie en huile.

$$\omega_{MG}^{Olives} \times W^{Olives} - \omega_{MG}^{Grignons} \times W^{Grignons} - \omega_{MG}^{Margines} \times W^{Margines} - \omega_{MG}^{Huile} \times W^{Huile} = 0$$

Équation 9. Conservation de la matière grasse

ω_{MG}^{olives} , $\omega_{MG}^{margines}$, $\omega_{MG}^{grignons}$ et ω_{MG}^{huile} sont les fractions massiques de matière grasse contenue respectivement dans les olives, les margines, les grignons et l'huile, W^{Olives} , $W^{Grignons}$, $W^{Margines}$ et W^{Huile} correspondent aux quantités respectives d'olives traitées, de grignons produits, de margines produites et d'huile extraite.

Après résolution du système, les quantités annuelles de margines, d'huile d'olive vierge, de grignons et d'eau de sortie sont les informations qui nourrissent l'inventaire des données pour l'AeCV et l'AcCV. L'intégration produit-procédé a lieu à cette étape de l'approche P²E.

12.3 Calculs d'inventaire

Les données brutes utilisées pour l'AeCV et l'AcCV concernent des flux de matières, d'énergie et de ressources humaines. Elles sont exprimées par année. Le calcul d'inventaire reprend ces données de flux brutes et les expriment par unité fonctionnelle pour aboutir à des données calculées (section 6.5.3). Afin de rendre compte des différents rendements annuels possibles, la production totale d'huile d'olive vierge sur la durée de vie T du système divisée en n périodes ($i=1$ à n) (Équation 10).

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_{t_i} \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^n t_i = T$$

Équation 10. Production totale d'huile d'olive vierge

Avec η_{t_i} la quantité annuelle d'huile d'olive vierge produite par le système sur une période t_i et η la quantité d'huile d'olive vierge produite par le système sur l'ensemble de sa durée de vie T (laquelle inclut théoriquement les phases de non production comme la pépinière).

Cette formule permet de tenir compte d'une variation temporelle des rendements agricoles (lesquels agissent directement sur la production d'huile d'olive) au plus proche de ce qui a été enregistré et ainsi de modéliser un comportement variable des rendements à venir. Pour le calcul d'inventaire du cycle de vie utilisé dans l'AeCV et l'AcCV, les flux échangés entre le système et l'environnement (au sens économique, social et écologique) sont distingués selon qu'ils sont liés à la construction d'une infrastructure (bâtiment, véhicule et moyens industriels) ou aux activités régulières de fonctionnement. Cette différenciation permet d'exprimer le flux de substance x (matière, énergie ou ressource humaine) lié au processus p à travers l'Équation 11.

$$\varphi_{x,p} = \frac{\sum_{j=1}^l \alpha_{x,p,j}^{in} \times m_{x,p,j}^{in} \times \frac{T}{\tau_j^2} + \sum_{k=1}^m \alpha_{x,p,t_i}^{fct} \times m_{x,p,t_i}^{fct}}{\eta}$$

Équation 11. Calcul de flux par unité fonctionnelle

$\varphi_{x,p}$ est la quantité par unité fonctionnelle de substance x (matière ou énergie) liée processus p , $\alpha_{x,p,j}^{in}$ et $m_{x,p,j}^{in}$ sont respectivement le facteur d'allocation et le flux total de la substance x liée au processus p pour construire l'infrastructure j , τ_j la durée de vie de l'infrastructure j , T la durée de vie du système agro-industriel, α_{x,p,t_i}^{fct} et m_{x,p,t_i}^{fct} sont respectivement le facteur d'allocation et le flux total de la substance x liée au processus p au cours de la période t_i et η la production d'huile d'olive vierge au cours de la durée de vie du système T (Équation 10).

Il convient de noter que cette équation est valable pour les l'AcCV et l'AeCV (donc pour l'évaluation du produit). En revanche, l'AsCV ne peut pas satisfaire cette équation dans la mesure où une grande partie des données sociales sont qualitatives et ne peuvent donc pas être exprimées par unité fonctionnelle (UNEP, 2009).

Une expression aussi générique permet de faire varier les facteurs d'allocation ainsi que les durées de vie du système afin de mettre en évidence l'influence de ces paramètres sur les résultats d'inventaire. Par ailleurs, il est possible de sommer, soit sur l'ensemble des processus p , soit sur la substance x . Après avoir déterminé les flux de matière, d'énergie et de ressources humaines par unité fonctionnelle à partir des données brutes, les émissions et extractions correspondantes peuvent être calculées. Un tel exercice consiste à utiliser des bases de données d'inventaire de cycle de vie qui listent l'ensemble des flux de matière et d'énergie par unité de produit utilisé dans l'étude en question. Il convient de remarquer que les bases de données d'inventaire ne contiennent pas de flux de ressources humaines. Par conséquent, sur cet aspect, il n'est pas encore possible d'avoir des informations sur l'ensemble du cycle de vie. Pour trouver les émissions et extractions

propres au cycle de vie étudié, il suffit de multiplier les flux de matière et d'énergie par unité de produit par la quantité du produit. Pour la présente étude, la base de données européenne Ecoinvent v2.2 a été utilisée pour les calculs d'extractions et d'émissions liés au cycle de vie en amont de tous les produits utilisés. Les émissions dues à la combustion de carburant (fioul, diesel ou essence) ont été calculés à partir d'un guide d'émission européen B810vs3.2 (European Environment Agency, 2006). Les facteurs d'émissions tirés de ce guide figurent en annexe 9. Finalement, les émissions de pesticides dans le sol ont été majorées et considérées comme égales aux quantités de pesticides utilisées en intrant dans le système.

Il convient enfin de rappeler ici que les données économiques internes et les données sociales ne subissent pas de calcul particulier au niveau de l'inventaire. Elles sont traitées lors de l'évaluation des impacts (section 7.2.3).

En ce qui concerne l'incertitude sur chaque donnée d'entrée quel que soit le volet de la durabilité, elle est calculée selon la méthode présentée dans la section 7.2.4. Elle n'est pas propagée dans l'outil &cOlive (sous-section 8.2.3.2). Cependant, les données environnementales qui proviennent en grande partie des bases de données sont porteuses d'une incertitude laquelle s'ajoute à l'incertitude sur les données d'entrée. Or pour les données économiques et sociales, l'absence de recours à des données indirectes limite l'incertitude à celle des données d'entrée brutes et calculées. C'est pourquoi la propagation de l'incertitude par simulation de Monte Carlo n'a été réalisée que pour la partie environnementale. Elle a été implémentée dans le logiciel d'ACV SimaPro.

Chapitre 13. Résultats d'évaluation & interprétation

Ce chapitre rassemble les résultats d'évaluation de la durabilité du système de production d'huile d'olive vierge. Il correspond à la cinquième et à la sixième étape de l'approche P²E (Figure 51).



Figure 51. Chapitre 13 et approche P²E

Il se divise en quatre sous-chapitres. Les trois premiers étudient un scénario moyen afin d'analyser le système de production d'huile d'olive et de dresser un portrait moyen sur la base des 31 indicateurs (critère de niveau 1). Chaque sous-chapitre correspond à un niveau d'approche : le procédé, le produit et l'entreprise. Pour l'évaluation du produit (sous-chapitre 13.2), une étude de sensibilité aux paramètres du système est présentée et la propagation de l'incertitude des résultats de l'AeCV est simulée à l'aide de la méthode Monte Carlo puis discutée.

Le quatrième sous-chapitre présente une agrégation de ces indicateurs (critère de niveau 1) en critères (critère de niveau 2) puis en score unique (critère de niveau 3) sans distinction quant à l'origine du critère (produit, procédé ou entreprise), comme le propose l'approche partielle P²E (Chapitre 7). Il compare la durabilité de différents scénarios dans le but de réaliser des choix de conception préliminaire ou détaillée.

Hormis la simulation de Monte Carlo supportée par le logiciel d'ACV SimaPro, tous les résultats d'évaluation ont pu être obtenus avec &cOlive.

Ils sont présentés selon les trois niveaux d'approche de conception intégrés par la proposition de cette thèse, à savoir l'approche P²E : procédé- produit- entreprise.

13.1 Évaluation technique du procédé & de l'incertitude

L'évaluation du procédé constitue la mise en boîte blanche ou grise du système de procédé (Figure 15). Dans le cas de l'outil &cOlive, il s'agit d'un modèle en boîte grise car le modèle mathématique qui relie les sortants du procédé aux entrants n'est pas connu. Seul le système d'équations à résoudre est formalisé (sous-chapitre 12.2). Les résultats de la simulation du procédé sont présentés dans le tableau 21 accompagnés de l'évaluation de l'incertitude moyenne des données d'entrée de l'étude complète.

Tableau 21. Résultats de l'évaluation technique et de l'incertitude moyenne sur les données d'entrée

Indicateurs	Unité	Verger*	Moulin
Rendement du procédé	%	n.c.	71%
Respect du bilan matière	%	n.c.	0,72%
Incertitude moyenne sur les données d'entrée	%	24%	22%

*n.c. = non concerné

Les indicateurs retenus qualifient l'étude (respect du bilan matière et incertitude moyenne sur les données d'entrée) et caractérisent le niveau d'optimisation potentielle du procédé d'extraction (rendement du procédé). L'incertitude moyenne sur les données d'entrée de l'étude est relativement basse car inférieure aux 30 % fixés pour la conception détaillée (section 7.3.2). Cette qualité s'explique par le nombre et la qualité des cas d'étude analysés. Le rendement du procédé se situe en dessous du rendement optimal situé autour de 86 %. En revanche, le modèle de procédé respecte le bilan matière à 0,72 % ce qui permet de le valider. Il convient de rappeler que le pourcentage qui caractérise le respect du bilan correspond à l'écart relatif entre la quantité de matière entrante et la quantité de matière sortante.

13.2 Évaluation du produit

Les résultats de l'évaluation du produit sont basés sur l'AeCV et l'AcCV et reprennent les résultats de la simulation du procédé. Leurs valeurs numériques sont détaillées dans les tableaux en annexe 13. Néanmoins, la comparaison de divers scénarios impose que certains paramètres soient fixés dans un premier temps pour qu'un scénario moyen de référence soit établi (ces paramètres sont en vert dans le tableau 20). Les trois paramètres de composition de l'olive (teneur en eau, en matière sèche et matière grasse) correspondent aux valeurs moyennes de la variété « Aglandau » car elle est majoritaire dans les vergers étudiés (Pinatel *et al.*, 2007). La quantité d'olives traitées par an et la surface cultivée correspondante proviennent de la moyenne des cas étudiés. Les autres paramètres sont estimés. L'ensemble de ces paramètres seront discutés dans la section 13.2.2 dédiée à l'analyse de sensibilité. Il convient de rappeler que les résultats d'AeCV et d'AcCV sont exprimés par rapport à l'unité fonctionnelle principale, à savoir la production d'1 L d'huile d'olive vierge.

13.2.1 Analyse environnementale et des coûts du cycle de vie

La figure 52 présente les résultats par « catégorie d'impacts intermédiaires ». La phase agricole (sous-système « verger ») du cycle de vie présente davantage d'impacts que les autres phases (associées au sous-système « moulin ») pour dix-sept des dix-neuf indicateurs sélectionnés pour

l'AeCV et l'AcCV (Figure 52). Quatorze d'entre elles possèdent un écart relatif de 30 % ou plus. Toutes les études dont les limites de système s'étendent au moins du berceau au moulin corroborent ce résultat selon lequel les impacts de la phase agricole surpassent ceux de la phase d'extraction (Avraamides et Fatta, 2008, 2006; Busset *et al.*, 2012a, 2012c; Cortes, 2006; Espi *et al.*, 2013; Georgiou *et al.*, 2006; Michalopoulos *et al.*, 2011; Neri, 2006; Notarnicola *et al.*, 2004; Recchia *et al.*, 2011). Cette tendance générale est confirmée par l'étude bibliographique de (Salomone *et al.*, 2010).

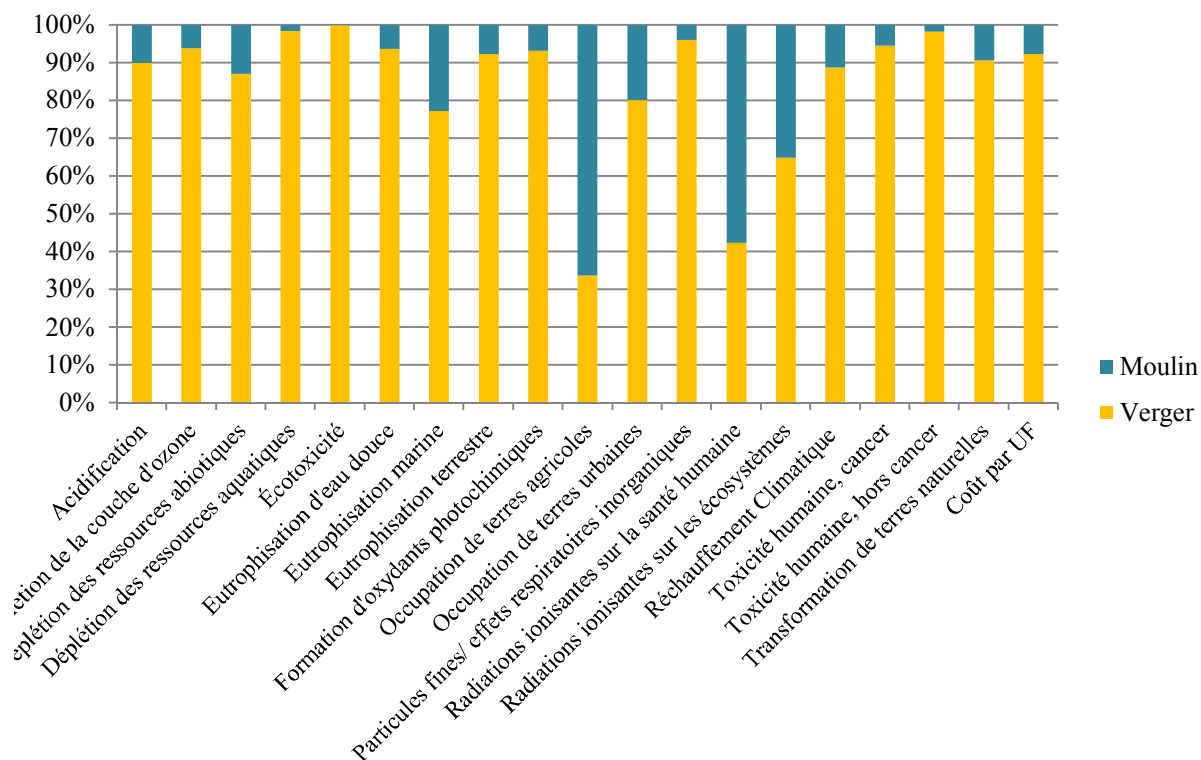


Figure 52. AeCV et AcCV de la production d'huile d'olive vierge, scénario moyen, impacts intermédiaires

Afin d'identifier plus précisément ce qui pèse sur les résultats au cours de la phase oléicole, il s'avère indispensable de focaliser l'analyse sur les processus qui entrent en jeu à ce moment du cycle de vie. Les résultats d'AcCV et d'AeCV de la phase oléicole du cycle de vie de l'huile d'olive montrent que la répartition des impacts en fonction des processus est variable (Figure 53).

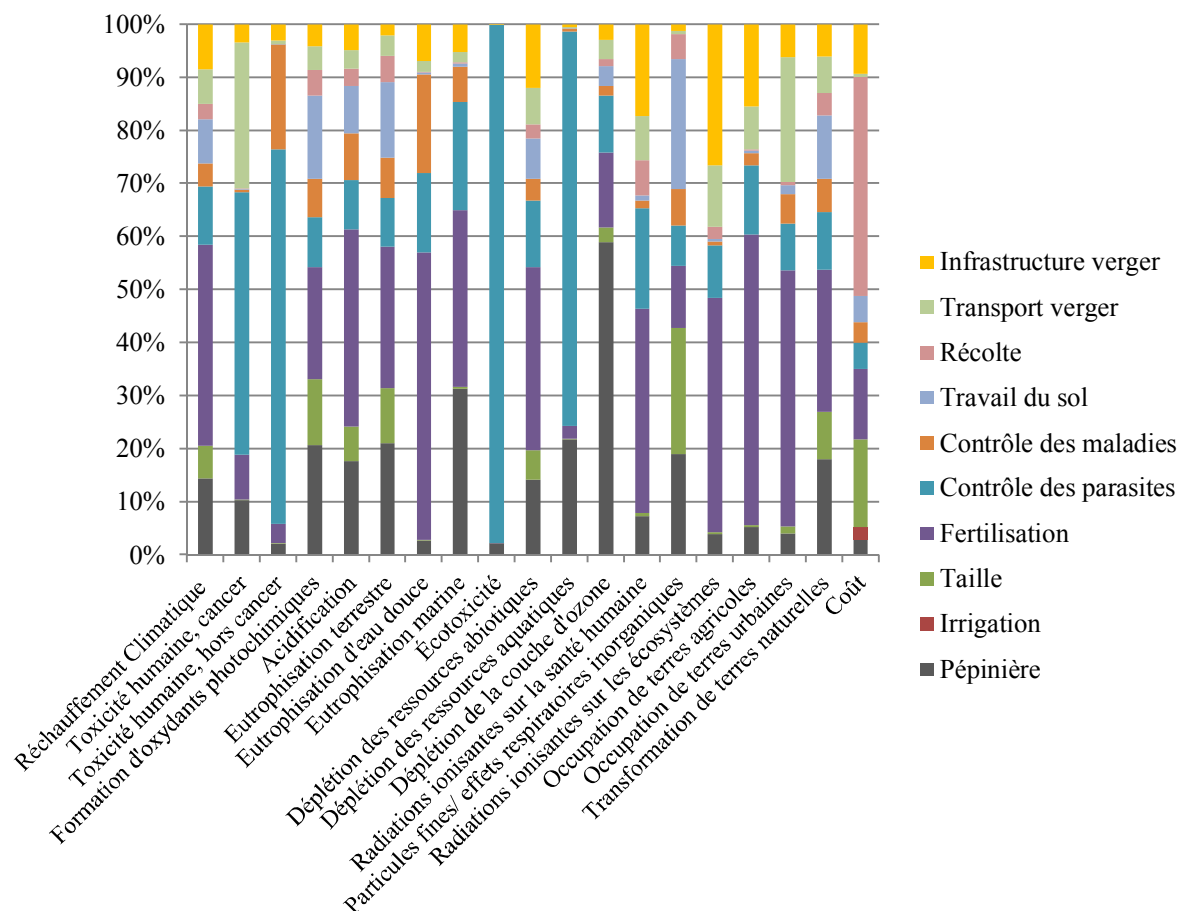


Figure 53. Résultats d'AcCV et d'AcCV pour la phase oléicole, scénario moyen, impacts intermédiaires

Les processus de traitement phytosanitaire des oliviers pour le contrôle des maladies et des parasites ont un impact prépondérant sur les catégories « toxicité humaine, cancer », « toxicité humaine, hors cancer » et « écotoxicité » avec respectivement plus de 50 %, plus de 90 % et plus de 97 % de l'impact total. La toxicité humaine cancérigène est provoquée par les formaldéhydes à près de 83 %. Ils sont émis lors de la combustion des carburants dans les moteurs de véhicules ou de machines agricoles. En ce qui concerne la toxicité humaine non cancérigène, 70 % proviennent de l'émission de diméthoate dans le sol et 25 % de disulfure de carbone. Le premier est émis lors de son épandage pour lutter contre la mouche de l'olive, le second est émis lors de la fabrication des pesticides. Quant à l'écotoxicité, elle trouve sa source à 86 % dans l'émission de diméthoate dans le sol et à 11 % dans l'émission de glyphosate pour désherber.

Ensuite, la fertilisation occupe une place importante dans les catégories d'impact sur l'eutrophisation (eutrophisation marine, d'eau douce et terrestre). Les principales substances émises qui favorisent l'eutrophisation le sont pendant la fertilisation et au cours du cycle de vie des infrastructures. Pour l'eutrophisation d'eau douce, les émissions de composés phosphorés

dans l'eau contribuent à 99 % des impacts. Les émissions d'ammoniac et d'oxydes d'azote dans l'air se partagent les impacts sur l'eutrophisation terrestre avec respectivement 7 % et 93 % du total. Finalement, l'eutrophisation marine est provoquée à 11 % par l'ammoniaque émis dans l'air, à 44 % par l'ion ammonium émis dans l'eau et à 35 % par les nitrates émis dans l'eau. Les 10 % restants sont provoqués par l'émission de composés azotés dans l'eau.

En ce qui concerne la taille et le travail du sol, ils représentent à eux seuls plus de 48 % des particules fines émises à cause de la combustion de diesel dans les moteurs des machines agricoles utilisées. Le principal polluant est le monoxyde de carbone avec près de 89 % des impacts sur cette catégorie.

Contrairement à ce qui pourrait être attendu, l'irrigation ne présente qu'un faible impact sur la déplétion des ressources en eau avec près de 1 % de l'impact total. La pépinière et le traitement des parasites sont en revanche à l'origine de 22 % et 73 % respectivement. Les raisons d'un tel résultat se trouvent dans les grandes quantités d'eau utilisées pour la fabrication des insecticides et des herbicides, notamment le diméthoate et le glyphosate.

Le principal gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique de la phase oléicole du cycle de vie est le dioxyde de carbone à près de 83 %. Il est lié à la combustion des carburants dans les machines agricoles et lors des transports. C'est pourquoi il se répartit dans tous les processus de la phase oléicole, chacune ayant recours à des engins mécaniques à moteur. Il convient de souligner le fait que l'empreinte carbone (autre nom pour désigner l'impact sur le réchauffement climatique) pour la production d'un litre d'huile d'olive vierge moyenne en France est de 3,0 kg CO₂ équivalent.

La pépinière contribue à 59 % à la déplétion de la couche d'ozone. Les principales substances impliquées sont le bromotrifluorométhane (Halon 1301) et le tétrachloro-méthane (CFC-10) (plus de 91 % des impacts). Ils sont émis dans l'air lors du cycle de vie des fongicides et herbicides particulièrement utilisés pendant la pépinière.

Tous les processus au cours desquels interviennent des combustions carburants, particulièrement le diesel, contribuent à l'acidification. Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote émis dans l'air représentent respectivement 48 % et 49 % des impacts sur cette catégorie. En outre, les oxydes d'azote présentent un fort impact sur la formation d'oxydants photochimiques avec 79 % des impacts sur cette catégorie. Les composés organiques volatils hors méthane occupent la deuxième place avec 17 % des impacts.

En ce qui concerne la déplétion des ressources abiotiques, 35 % des impacts sont dus à l'étape de fertilisation, 17 % au traitement phytosanitaire (contrôle des parasites et des maladies), 14 % à la pépinière, 12 % aux infrastructures. Le reste des impacts sur cette catégorie est partagé entre les différentes phases restantes. L'utilisation de carburants et de minerais sont les causes principales de la déplétion des ressources abiotiques. Les substances majoritairement extraites sont le pétrole (60 %), le gaz naturel (27 %) et le charbon (13 %). Les catégories d'impacts radiations ionisantes sur la santé humaine et sur les écosystèmes subissent des impacts dus à la fertilisation, aux traitements phytosanitaires et aux infrastructures. Les substances radioactives qui agissent sur la santé humaine sont le carbone 14 (33 %) et le radon 222 (66 %) tandis que celles qui agissent sur les écosystèmes sont le cobalt-60 (24 %), le césium-137 (23 %), le cobalt-58 (19 %), et l'argent-110 (19 %).

L'analyse de la littérature scientifique sur l'AeCV de l'huile d'olive montre également que l'importance de l'agriculture a pour principale cause la fertilisation et les traitements phytosanitaires. Cependant, l'irrigation ressort également parmi les processus à fort impacts, notamment à cause du pompage. Des problèmes d'accès à la donnée n'ont pas permis de retrouver un tel résultat pour les cas d'étude français. En outre, lorsque les résidus de taille des oliviers sont brûlés, les émissions polluantes dans l'air font peser ce processus de la phase agricole (Avraamides et Fatta, 2008, 2006; Dessane, 2003; Georgiou *et al.*, 2006; Michalopoulos *et al.*, 2011). Cette pratique ne figurant pas parmi les plus courantes en France, elle n'apparaît logiquement pas en tant que processus d'importance.

Bien que la phase industrielle d'extraction de l'huile d'olive vierge ne soit pas prépondérante, ses impacts dépassent ceux de la phase oléicole dans 2 catégories sur les 19 (Figure 52). Il convient donc d'étudier également l'origine des impacts de cette phase parmi les processus qui la constituent. La figure 54 montre que les infrastructures sont prépondérantes (contribution supérieure à 31 % pour une catégorie donnée) dans 10 catégories d'impacts sur les 19 (Réchauffement climatique, toxicité humaine (cancer), toxicité humaine (hors cancer), formation d'oxydants photochimiques, acidification, eutrophisation terrestre, eutrophisation d'eau douce, déplétion des ressources abiotiques, particules fines/ effets respiratoires inorganiques, coût). Le remplissage a le plus d'impacts dans 4 autres catégories (Écotoxicité, déplétion de la couche d'ozone, occupation de terres agricoles, transformation de terres naturelles). Ces deux processus ont le plus d'impacts environnemental à cause de la quantité de matière nécessaire aux infrastructures et aux bouteilles et du fait que l'extraction de l'huile d'olive ne soit réalisée que par des procédés mécaniques à des températures inférieures à 35°C. En effet, les procédés mécaniques ne requièrent que de l'énergie électrique produite en France donc à partir d'énergie nucléaire en majorité. La prépondérance des

processus d'extraction pour les catégories radiations ionisantes sur la santé humaine et radiations ionisantes sur les écosystèmes corroborent cette interprétation.

La centrifugation horizontale à trois phases contribue le plus fortement à la déplétion des ressources aquatiques car elle nécessite davantage d'eau que les technologies d'extraction à deux phases ou par presse.

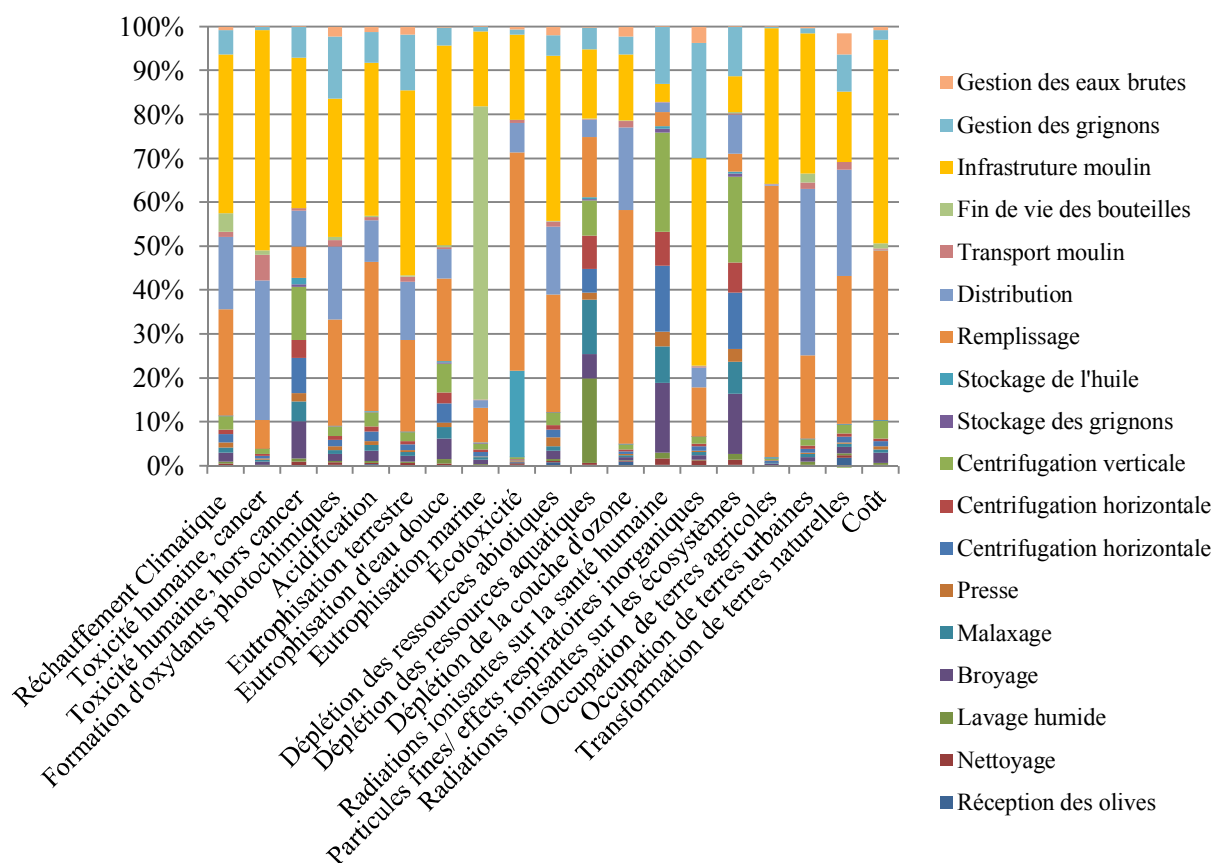


Figure 54. Résultats d'AcCV et d'AcCV pour la phase industrielle, scénario moyen, impacts intermédiaires

13.2.2 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est menée sur les paramètres globaux du système tels que sa durée de vie, la durée de vie moyenne des infrastructures, le rendement d'extraction et la durée de la pépinière. Elle est réalisée sur l'évaluation du produit car il s'agit du seul sous-système réellement relié à ces paramètres. En effet, dans l'approche P²E appliquée à la production d'huile d'olive, les données du procédé ne sont pas influencées par les paramètres globaux du système de fait. En revanche, les données sociales et économiques de l'entreprise ne sont pas influencées par les paramètres globaux par manque de données et de modèles qui les lieraient auxdits paramètres.

Afin d'alléger la présentation des résultats, les valeurs des indicateurs sont rassemblées dans des tableaux présentés en annexes 15 et 16. Les résultats de l'étude de sensibilité utilisent l'indicateur de niveau 3 (score unique) pour le volet environnemental et l'indicateur de niveau 1 (coût global du cycle de vie) pour le volet économique. L'étude de sensibilité se limite à faire varier un seul paramètre à la fois. Le reste des paramètres et les données utilisées correspondent toujours au scénario moyen.

13.2.2.1 Influence de la durée de la pépinière

La pépinière constitue un processus clef du cycle de vie de l'huile d'olive vierge et en particulier dans la présente étude, notamment par son origine géographique (Portugal) et son fort impact. Il apparaît donc judicieux d'étudier l'influence de la durée de la pépinière qui est fixée à un an dans le cas du scénario moyen.

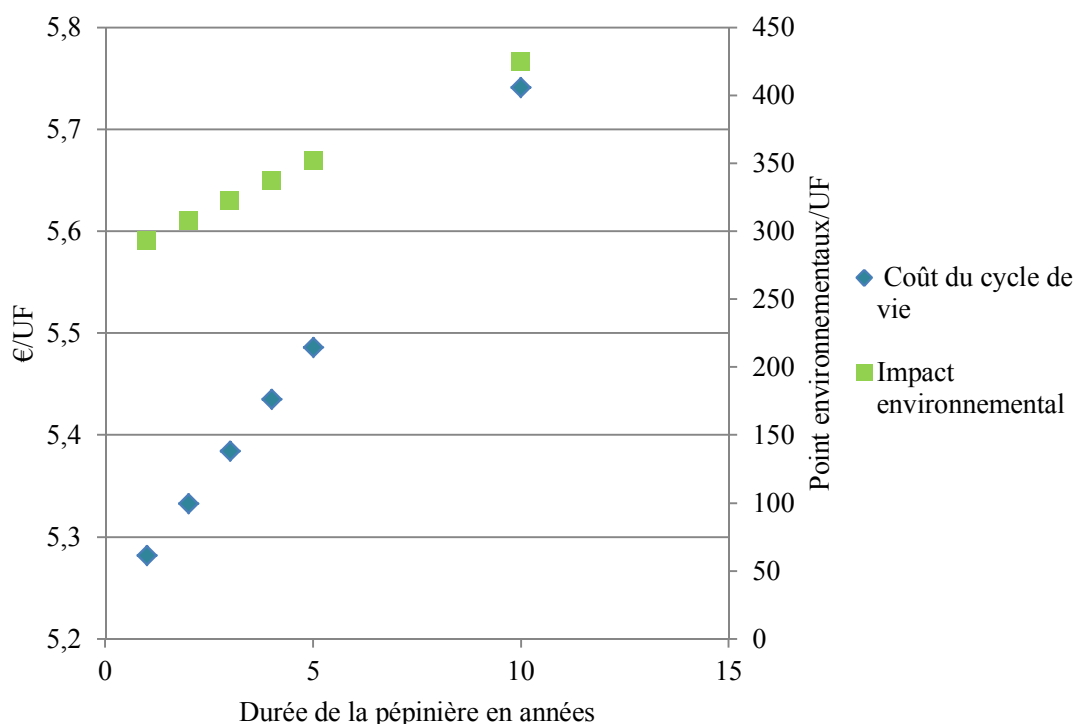


Figure 55. Influence de la durée de la pépinière

La figure 55 montre que les impacts environnementaux et les coûts du cycle de vie de production de l'huile d'olive augmentent avec la durée de la pépinière. Ce phénomène trouve son explication, d'une part, dans la forte demande en fertilisants et produits phytosanitaires au cours de ce processus, d'autre part, dans le faible rendement en olives donc en huile durant la croissance des jeunes oliviers.

13.2.2.2 Influence de la durée de vie du système

La durée de vie du système va influencer l'amortissement de la période de pépinière au cours de laquelle le système ne produit pas à plein régime ainsi que le nombre d'infrastructures nécessaires à l'accomplissement de l'unité fonctionnelle.

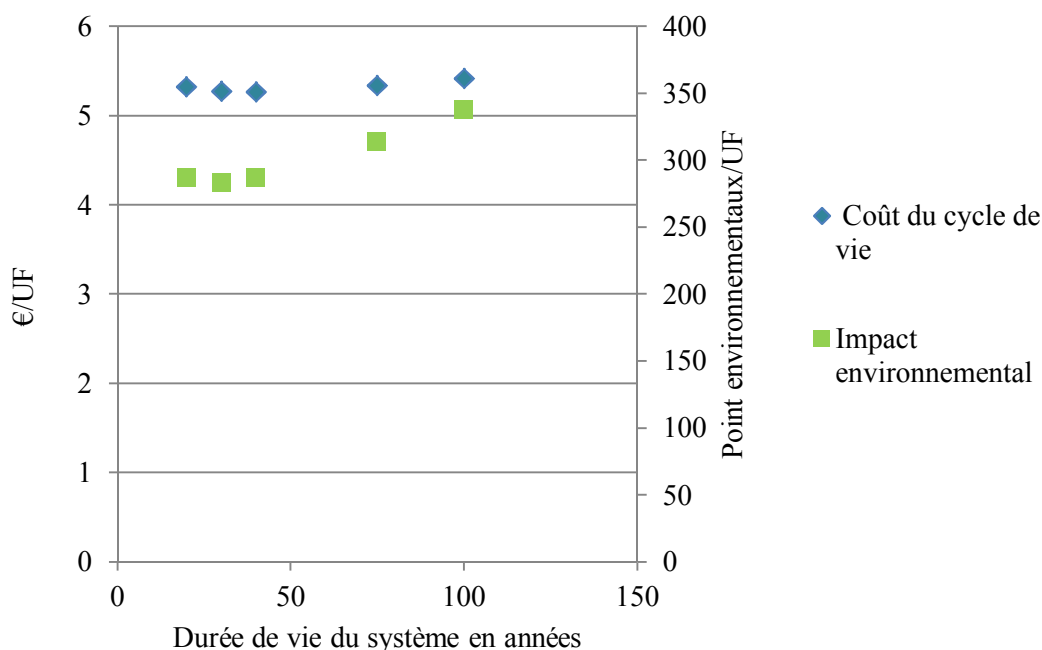


Figure 56. Influence de la durée de vie du système

Les coûts et l'impact environnemental du cycle de vie de la production d'huile d'olive vierge semblent atteindre un niveau minimal pour une durée de vie du système située respectivement autour de 37 ans et de 28 ans pour l'impact environnemental. Le coût par unité fonctionnelle est alors de 5,27 €/UF tandis que l'impact environnemental est de 283 points environnementaux.

13.2.2.3 Influence de la durée de vie moyenne des infrastructures

Les infrastructures représentent de 0 % à 28 % des impacts de l'ensemble du cycle de vie, selon la catégorie intermédiaire. Cela donne en moyenne une importance d'environ 9 %. Une telle importance des infrastructures dans le cycle de vie du système de production d'huile d'olive amène logiquement à s'intéresser à la sensibilité de leur durée de vie. Cette dernière va influencer le nombre d'infrastructures (machines, bâtiments, etc.) qu'il faudra pendant le cycle de vie. La figure 57 montre que le coût du cycle de vie passe de 6,24 €/L à 4,96 €/L (soit une diminution de 20

%) entre une durée de vie des infrastructures comprise entre 20 ans et 100 ans. L'impact environnemental diminue aussi dans le même intervalle mais de 34 %.

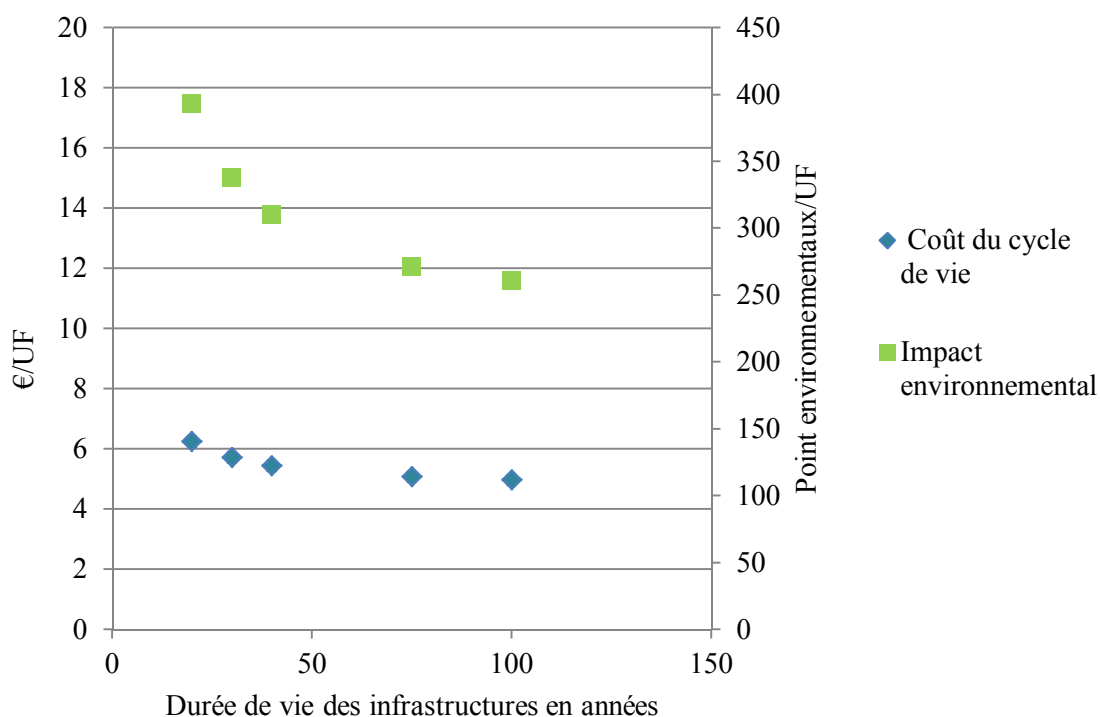


Figure 57. Influence de la durée de vie moyenne des infrastructures

Compte tenu de la particularité de l'industrie de l'huile d'olive qui utilise peu d'énergie, les infrastructures constituent un impact environnemental non négligeable. Plus leur durée de vie est grande, plus cet impact diminue.

13.2.2.4 Influence des rendements d'extraction

Les rendements d'extraction expriment la quantité d'huile extraite par rapport à la quantité d'huile totale contenue dans les olives. Par des procédés mécaniques – donc des procédés utilisables pour une extraction à froid de l'huile d'olive vierge – le rendement maximal s'établit autour de 86 %. L'étude de l'influence des rendements d'extraction constitue une preuve de l'utilité et du bon fonctionnement de l'intégration entre le modèle de procédé et le modèle de produit dans l'outil &cOlive.

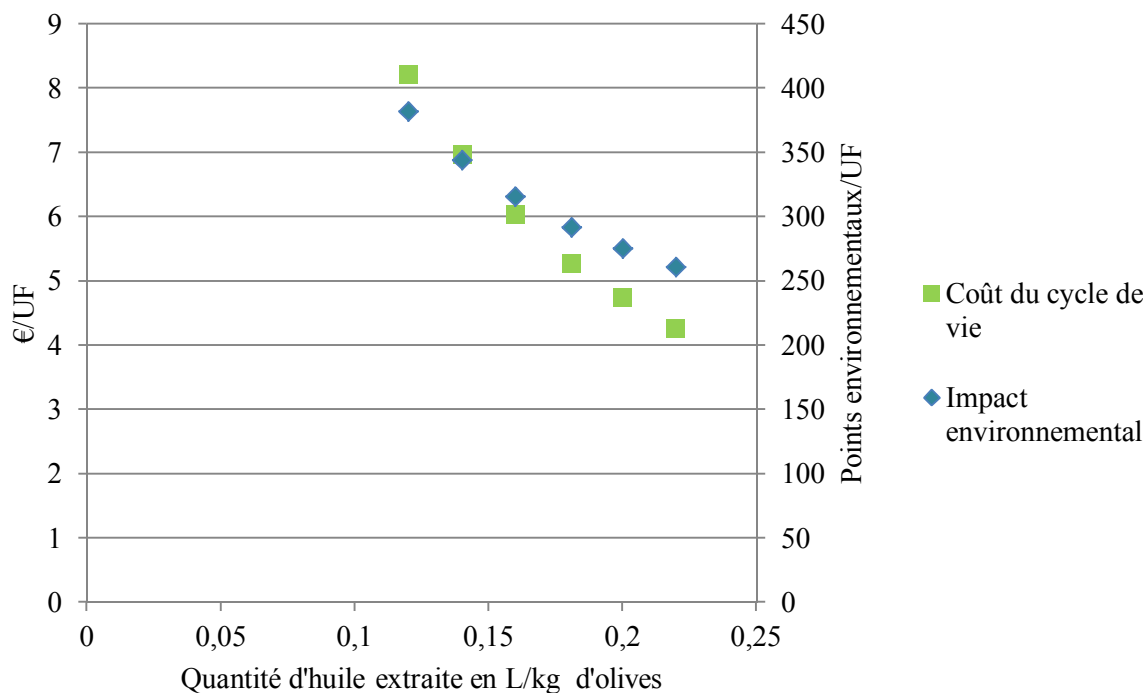


Figure 58. Influence des rendements d'extraction

La figure 58 met en exergue l'importance du rendement d'extraction sur les coûts du cycle de vie et sur les impacts environnementaux. Les coûts comme les impacts environnementaux varient en sens inverse du rendement d'extraction. Les coûts passent de 8,20 €/UF à 4,26 €/UF pour un rendement respectif de 0,12 L d'huile/kg d'olives à 0,22 L d'huile/kg d'olives. Les impacts environnementaux diminuent quant à eux de 382 à 261 points environnementaux. Cette prépondérance s'explique par la définition de l'unité fonctionnelle directement liée au rendement d'extraction.

13.2.3 Analyse de Monte Carlo

La qualité des données a été répercutée dans les résultats de l'analyse environnementale du cycle de vie du produit à travers une simulation de Monte Carlo. Parmi toutes les données de l'étude (données d'entrée et données issues de la base de données), 72,2 % d'entre elles étaient accompagnées d'une incertitude. En effet, la base de données Ecoinvent ne fournit pas d'incertitude pour toutes les données qu'elle contient. La distribution statistique des valeurs des données correspondantes suit une loi log-normale. Le tableau 22 rassemble les résultats de la simulation de Monte Carlo réalisée sur le scénario moyen avec 10 000 itérations.

Tableau 22. Simulation de Monte Carlo pour l'AeCV, scénario moyen, catégories intermédiaires

Catégorie d'impact intermédiaire	Unité	Moyenne	Médiane	Écart-type	Coefficient de Variation	2,5%	97,5%
Déplétion des ressources abiotiques	kg Sb eq	0,0195	0,0192	0,00224	11,5%	0,0164	0,0249
Acidification	kg H ⁺ eq	0,0336	0,0325	0,00524	15,6%	0,0282	0,0459
Occupation de terres agricoles	m ² a	0,0925	0,0848	0,0342	36,9%	0,0504	0,175
Réchauffement Climatique	kg CO ₂ -Eq.	2,94	2,93	0,155	5,26%	2,68	3,28
Écotoxicité	CTUe	10,4	10,4	0,867	8,31%	8,85	12,3
Eutrophisation terrestre	kg N eq	0,104	0,104	0,00725	6,96%	0,0913	0,12
Eutrophisation d'eau douce	kg P eq	0,00188	0,00178	0,000558	29,7%	0,00126	0,00317
Toxicité humaine, cancer	CTUh	6,59 10 ¹⁰	6,45 10 ¹⁰	1,11 10 ¹⁰	16,8%	4,84 10 ¹⁰	9,15 10 ¹⁰
Toxicité humaine, hors cancer	CTUh	5,93 10 ⁹	5,86 10 ⁹	6,37 10 ¹⁰	10,8%	4,85 10 ⁹	7,35 10 ⁹
Radiations ionisantes sur les écosystèmes	CTUe	2,54 10 ²⁰	2,50 10 ²⁰	3,95 10 ²¹	15,5%	1,89 10 ²⁰	3,43 10 ²⁰
Radiations ionisantes sur la santé humaine	kBq U-235 eq	0,941	0,659	1,07	114%	0,278	3,4
Eutrophisation marine	kg N eq	0,000496	0,000492	4,66E-05	9,40%	0,000419	0,000598
Transformation de terres naturelles	m ²	0,000907	0,000836	0,000501	55,3%	0,000153	0,00209
Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq	7,08 10 ⁷	6,86 10 ⁷	1,59 10 ⁷	22,5%	4,58 10 ⁷	1,08 10 ⁶
Particules fines/effets respiratoires inorganiques	mg PM in	0,244	0,231	0,0735	30,1%	0,144	0,422
Formation d'oxydants photochimiques	kg NMVOC	0,025	0,0249	0,00155	6,18%	0,0223	0,0283
Déplétion des ressources aquatiques	UBP	550	547	35,8	6,51%	487	627
Occupation de terres urbaines	m ² a	0,0246	0,0241	0,00354	14,4%	0,0193	0,0331

L'incertitude moyenne de l'ensemble des catégories d'impacts intermédiaire est de 23 %. Cependant, la médiane n'est que de 15 %. En considérant qu'une incertitude inférieure à 30 % pour des résultats d'évaluation lors de la phase de conception détaillée est acceptable, l'étude du système de production d'huile d'olive par l'application de l'approche P²E permet d'aboutir à des décisions

réalistes et cohérentes basées sur des résultats fiables pour 14 des 18 catégories d'impacts environnementaux intermédiaires. Les résultats des quatre autres catégories (Occupation de terres agricoles, Radiations ionisantes sur la santé humaine, Transformation de terres naturelles et Particules fines/ effets respiratoires inorganiques) sont très incertains et une décision basée sur ces critères semble difficile. Cette incertitude sur les résultats d'évaluation des impacts intermédiaires est du même ordre de grandeur que l'incertitude moyenne sur les données d'inventaire établie à 24 % pour le sous-système « verger » et 22 % pour le sous-système « moulin ».

13.3 Évaluation de l'entreprise

L'évaluation de l'entreprise permet d'appréhender les aspects sociaux et économiques globaux liés indirectement au produit et par conséquent au procédé. Ainsi, l'analyse sociale du cycle de vie et l'évaluation économique de l'entreprise relèvent de cette approche entreprise du problème au niveau des deux sous-systèmes « verger » et « moulins ».

13.3.1 Analyse sociale du cycle de vie

L'analyse sociale du cycle de vie s'est heurtée à un manque de données avec un retour de deux questionnaires de la part de deux mouliniers. Ainsi, il n'a pas été possible d'implémenter plusieurs scénarios concernant ce volet de l'évaluation de la durabilité. Un scénario unique a été élaboré à partir des deux questionnaires reçus. Les données d'inventaire ont été présentées dans le tableau 20. Les résultats du calcul des indicateurs sont rassemblés dans le tableau 23. Il est donc difficile de tirer une interprétation des résultats hormis de constater que le verger paraît plus positif sur la santé/sécurité au travail et sur l'emploi local.

Tableau 23. Résultats de l'AsCV par sous-catégorie d'indicateurs, scénario moyen

Indicateurs	Unité	Verger	Moulin
Santé Sécurité au travail	Sans unité	5	3
Santé du consommateur	Sans unité	1	1
Développement de la technologie	Sans unité	0	0
Emploi local	Sans unité	8,3	6,3
Promotion de la responsabilité sociale	Sans unité	1	1

L'approche P²E permet donc d'aborder les aspects sociaux liés à l'entreprise. Cependant, cet aspect reste mathématiquement indépendant de la modélisation du procédé et du produit à cause d'un manque de données précises sur le modèle d'interaction social. *A fortiori*, aucun lien n'est implémenté dans &cOlive. C'est la raison pour laquelle les résultats d'AsCV ne sont pas étudiés dans l'analyse de sensibilité des paramètres globaux (section 13.2.2).

13.3.2 Évaluation économique

L'évaluation économique représente le deuxième aspect de l'approche entreprise de l'évaluation de la durabilité. En effet, les données dont elle a besoin concernent l'échelle systémique de l'entreprise. Les indicateurs retenus ont été calculés à partir de données moyennes estimées à partir des cas d'étude analysés. Cependant, l'accès aux données économiques nécessaires au calcul des indicateurs n'a pas toujours été simple et une moyenne par scénario a été impossible à établir précisément. Les trois indicateurs de l'évaluation économique calculés à partir des données du scénario moyen (Tableau 20) sont présentés dans le tableau 24. Pour chacune des deux entreprises centrales du système de production de l'huile d'olive vierge, le bénéfice actualisé (BACT) et le temps de retour sur investissement (TRI) sont positifs. Par ailleurs, les taux de rentabilité interne dépassent le taux d'actualisation fixé à 10 % (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 24. Résultats de l'évaluation économique, scénario moyen

Indicateurs	Unité	Verger	Moulin
Bénéfice actualisé	€	1,7 10 ⁵	5,5 10 ⁵
Temps de retour sur investissement	Année	3,4	4,5
Taux de rentabilité interne	Sans unité	18 %	12 %

À cause de ce manque d'information économique, il n'a pas été possible de coupler l'évaluation économique avec la simulation du procédé, l'AeCV et l'AcCV et donc de réaliser une analyse de sensibilité aux paramètres globaux du système de production d'huile d'olive (section 13.2.2). Cependant, quel que soit le niveau de couplage, il convient de rappeler que l'approche P²E pour la durabilité s'inscrit dans un processus de décision. Aussi, la dernière étape qui la compose doit aboutir à un choix de conception ou de re-conception (préliminaire ou détaillée). Pour faciliter ce choix, l'évaluation multicritère pour la durabilité est utilisée pour réduire le nombre d'indicateurs issus de l'évaluation du système « procédé-produit-entreprise » de production d'huile d'olive vierge. Ainsi, un tel traitement des indicateurs permet de considérer l'entreprise, les procédés et les produits cette fois autour des différents volets de la durabilité caractérisés par l'approche P²E.

13.4 Évaluation de la durabilité

L'évaluation de la durabilité par l'approche P²E aboutit finalement au calcul de deux critères de niveau 3 (l'impact environnemental, l'impact social) et un critère de niveau 2 (la viabilité économique) qui caractérisent la durabilité ainsi que de deux critères de niveau 2 transversaux (l'efficacité du procédé et la pertinence de l'étude) à partir desquels un choix de conception ou de re-conception pourra être fait. Elle s'appuie sur les résultats des sous-chapitres 13.1, 13.2 et 13.3.

Ainsi, à partir des résultats intermédiaires selon les systèmes étudiés (procédé, produit, entreprise), le présent sous-chapitre donne des résultats d'évaluation de la durabilité selon les cinq aspects : technique, environnemental, économique et social et de la pertinence de l'étude. Les méthodes d'agrégation des indicateurs sont décrites dans la section 7.3.1.

Après transformation des indicateurs de rendement en critère d'efficacité du procédé, et des indicateurs du respect du bilan matière et de l'incertitude moyenne sur les données d'entrée en critère de pertinence de l'étude, les résultats montrent que le scénario moyen possède un rendement à optimiser. La simulation du procédé respectant le bilan matière et l'incertitude sur les données d'entrée étant inférieure à 30 % pour les deux systèmes « verger » et « moulin » (Tableau 21), le critère de pertinence de l'étude prend la valeur « étude pertinente » et le critère technique prend la valeur « procédé efficace ». Il en découle la possibilité pour les décideurs de réaliser un choix de conception en s'appuyant sur les résultats issus de l'application de l'approche P²E. Les trois options technologiques pour le procédé d'extraction d'huile d'olive vierge présentent des rendements différents et s'inscrivent dans le cycle de vie du produit (l'huile d'olive vierge). Ainsi, les choix de conception durable ne peuvent pas être réalisés avec les seuls critères technique et de pertinence de l'étude. Les aspects environnementaux, économiques et sociaux doivent venir compléter ces critères.

Le volet environnemental de l'étude repose sur la détermination du score unique environnemental (ou critère de niveau 3 d'après l'ontologie de la partie B) du produit tout au long de son cycle de vie. Il est exprimé en points environnementaux et demeure difficilement interprétable dans l'absolu. En revanche, il est très utile pour comparer différents scénarios décrits dans le sous-chapitre 11.3.3 ou pour faire une étude de sensibilité comme dans la section 13.2.2.

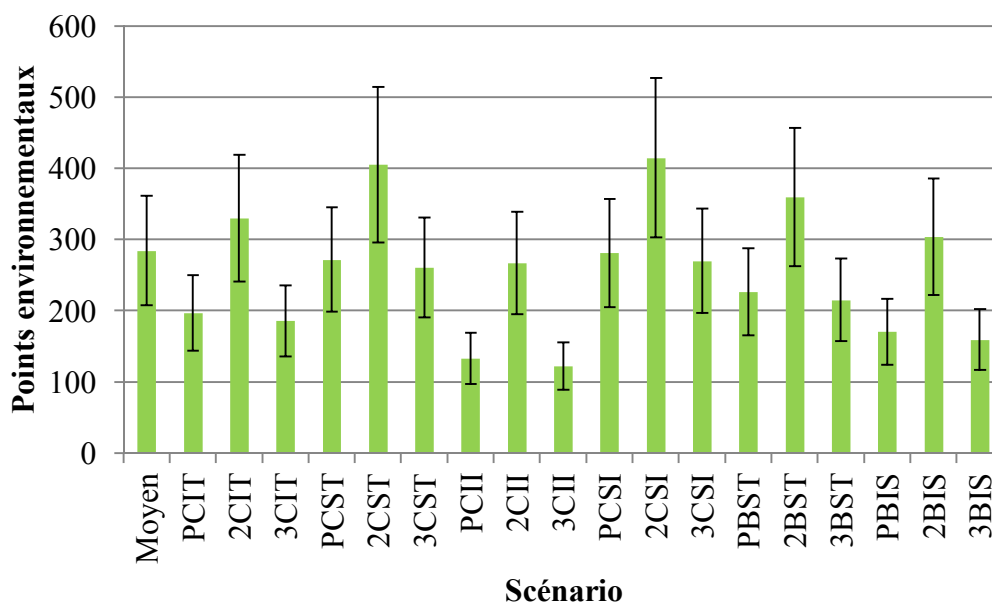
En ce qui concerne l'évaluation du volet social, le tableau 25 rassemble les résultats de dommages sociaux (critère de niveau 2) par partie prenante issus des impacts intermédiaires. Si un résultat de 100 % est atteint, l'impact sur la catégorie de partie prenante est minimal ce qui revient à dire que l'entreprise n'a pas à modifier son action vis-à-vis de cette partie prenante. Dans le cas étudié, l'oléiculteur (verger) et le moulinier (moulin) respectent les travailleurs ainsi que les acteurs de la chaîne de valeur mais peuvent améliorer leur impact sur les consommateurs, la société et la communauté locale.

Tableau 25. Résultats de dommages sociaux sur les catégories de parties prenantes

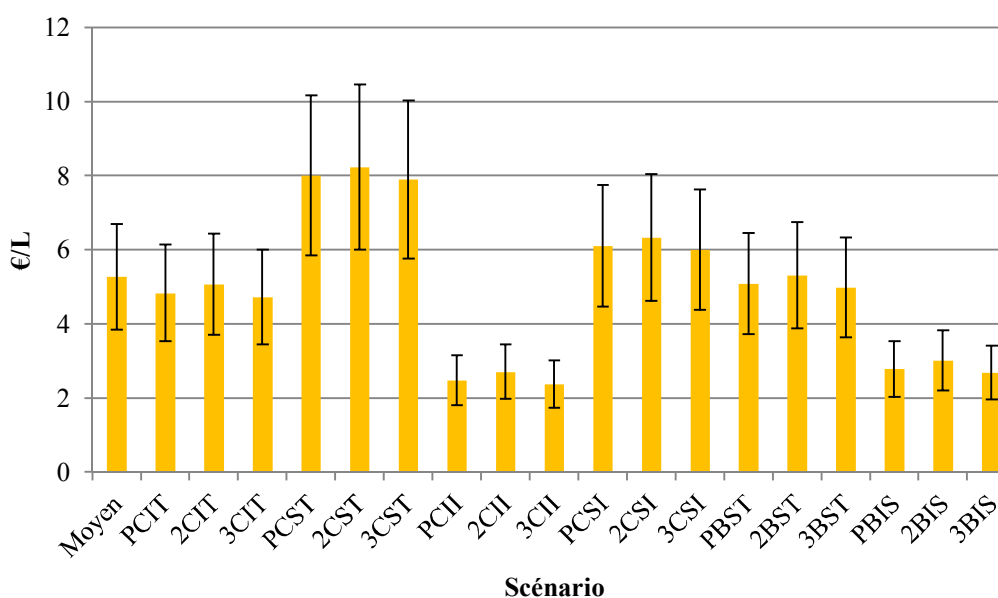
Dommages sociaux	Unité	Verger	Moulin
Travailleurs	%	100	60
Consommateurs	%	50	50
Société	%	0	0
Communauté locale	%	63	48
Chaîne de valeur	%	100	100

Le dernier volet est le volet économique qui reprend les résultats de l'AcCV orientée produit et de l'évaluation économique de l'entreprise. L'agrégation des quatre indicateurs du volet économique aboutit à un critère unique de faisabilité économique. Les résultats du volet économique sont influencés par le scénario du système de production d'huile d'olive vierge. Cependant, quelle que soit la technologie d'extraction utilisée, le système sera faisable sur le plan économique. Pour ensuite déterminer le système le plus rentable, il faut redescendre le niveau de l'analyse vers des indicateurs tels que le BACT par exemple. Un des paramètres clés pour le critère de faisabilité économique reste le prix de vente.

À partir des résultats de l'évaluation de la durabilité, les scénarios du système de production d'huile d'olive vierge, présentés dans le tableau 17, ont été comparés. Les résultats détaillés sont rassemblés en annexe 14. Compte tenu du manque de données économiques et sociales de l'entreprise à propos des différents scénarios, il n'a pas été possible d'inclure ces deux aspects. Ainsi, dans le but de réaliser un choix de conception guidée par l'évaluation de la durabilité, les scénarios sont comparés. Seules les données issues du produit et du procédé servent à la comparaison des scénarios. Les figures 59 a) et b), représentent respectivement les impacts environnementaux et les coûts du cycle de vie des scénarios, accompagnés de l'incertitude. Malgré l'incertitude importante sur les résultats (Figures 59 a) et b)), il est possible de dégager plusieurs tendances. Deux types de tendances se dégagent : celles propres à la production d'huile d'olive et celles davantage influencées par la structure même de l'étude, notamment à cause de la construction de scénarios fixes.



a)



b)

Figure 59. Comparaison des scénarios de production d'huile d'olive vierge a) résultats pour le score unique d'impact environnemental et b) pour les coûts du cycle de vie

Culture irriguée contre culture sèche

L'influence de l'irrigation sur les rendements agricoles n'est plus à prouver. Par exemple, les cas d'étude analysés dans ce travail montrent une augmentation du rendement moyen en olive de 1,9 t/ha pour les cultures non irriguées à 3,4 t/ha pour les cultures irriguées (Tableau 18). Une telle augmentation du rendement aboutit à la diminution des impacts et des coûts du cycle de vie (car ils restent exprimés par quantité d'olives ou d'huile d'olive produites) (Figure 59). En revanche,

l'irrigation apporte de nouveaux impacts au cycle de vie qu'il faut ajouter. Ainsi, l'influence de l'irrigation doit être quantifiée et incluse dans les études. Les études de Busset *et al.*, Tecchia *et al.* et Salomone *et al.* convergent vers la conclusion selon laquelle la culture irriguée présente moins d'impacts sur l'environnement (Busset *et al.*, 2012a; Recchia *et al.*, 2011; Salomone et Ioppolo, 2012). En revanche, Guzman et Alonso (2008) démontrent que la quantité d'énergie utilisée pour produire un litre d'huile d'olive est supérieure pour la culture irriguée. Par ailleurs, l'eau en tant que ressource locale ne subit pas la même pression selon la zone géographique des cas d'étude. S'il paraît primordial d'analyser l'impact d'un système sur la ressource en eau, il s'avère alors nécessaire de disposer de méthodes de caractérisation de tels impacts et ce, en fonction de la situation géographique du cas d'étude. En outre, dans des régions méditerranéennes où poussent l'olivier, l'eau demeure une ressource aussi précieuse que rare.

Culture biologique contre culture conventionnelle

Les figures 59 a) et b) montrent que les scénarios biologiques ont moins d'impacts que les scénarios conventionnels (à technologie d'extraction identique). En effet, les scénarios PBST, 2BST et 3BST présentent respectivement moins d'impacts que les scénarios PCST, 2CST et 3CST. Ce résultat se retrouve dans la littérature sur le sujet où la production biologique apparaît globalement plus favorable à l'environnement (Dessane, 2003; Guzman et Alonso, 2008; Kaltsas *et al.*, 2007; Neri, 2006; Notarnicola *et al.*, 2004; Olivieri *et al.*, 2005; Salomone et Ioppolo, 2012).

L'arboriculture conventionnelle utilise des intrants phytosanitaires et fertilisants d'origine chimique lesquels se retrouvent nécessairement dans les sols, dans l'eau ou sur les fruits. Certains produits utilisés tels que le glyphosate pour désherber et le diméthoate pour lutter contre la mouche de l'olive possèdent une faible biodégradabilité, une forte toxicité vis-à-vis des écosystèmes et de l'homme. L'épandage d'engrais minéraux, même s'il est optimal, conduit nécessairement à des contaminations des cours d'eau par lessivage et renforcent, par conséquent, le phénomène d'eutrophisation. Dessane a également montré que l'application de l'agriculture biologique à l'oléiculture préservait le sol contre l'érosion ainsi que la biodiversité contre son appauvrissement (Dessane, 2003). Par ailleurs, l'oléiculture biologique exerce une pression moins forte sur les énergies non-renouvelables en présentant une meilleure efficacité par litre d'huile d'olive produit (Guzman et Alonso, 2008). En revanche, une analyse détaillée montre que, pour l'utilisation des terres, le réchauffement climatique, la déplétion de la couche d'ozone et l'acidification, la culture conventionnelle présente moins d'impacts. Concernant l'empreinte carbone, l'Andalousie présente une empreinte carbone de 1,7 kg CO₂ équivalent, la Catalogne 3,7 kg CO₂ équivalent et la France 3,0 kg CO₂ équivalent (Espí *et al.*, 2013). Or l'Andalousie, qui présente la plus faible

empreinte carbone, est la région la plus intensive parmi les trois. Ce résultat corrobore ceux de la littérature.

Il convient de relever l'influence de l'unité fonctionnelle sur les résultats d'AeCV entre les deux pratiques agricoles. Bien que l'oléiculture biologique affiche des rendements en olives par hectare jusqu'à plus deux fois plus faibles que l'oléiculture conventionnelle, ses résultats d'impacts environnementaux sont meilleurs (donc plus bas) s'ils sont exprimés par hectare, même pour le réchauffement climatique. En revanche, les conclusions s'inversent quand les impacts sont exprimés par kg d'olive ou par L d'huile.

Comparaison des technologies d'extraction

Les trois options technologiques d'extraction de l'huile sont comparées dans les figures 59 a) et b) à travers six groupes de scénarios {PCIT, 2CIT, 3CIT}, {PCST, 2CST, 3CST}, {PCII, 2CII, 3CII}, {PCSI, 2CSI, 3CSI}, {PBST, 2BST, 3BST}, {PBIS, 2BIS, 3BIS}. Chaque groupe correspond à un type de culture, à une intensité de culture et un mode d'irrigation donnés. Ainsi, les résultats de la comparaison des technologies sont les mêmes quel que soit le groupe de scénarios (Figures 59 a) et b)). Le système 2-phases s'avère le moins favorable à l'environnement, suivi de la presse puis du système 3-phases. Dans les AeCV de l'huile d'olive qui offrent la possibilité d'une comparaison entre les technologies d'extraction, le système 3-phases présente le moins bon bilan environnemental suivi de la presse. Le meilleur système d'extraction en termes d'impact sur l'environnement est le système 2-phases (et 2,5 phases) (Notarnicola, Tassielli, et Nicoletti, 2004 ; Salomone et Ioppolo, 2012). La divergence avec les résultats de la littérature scientifique s'explique par la particularité du système d'extraction 3-phases étudié. En effet, ce dernier présente d'un côté un bon taux d'extraction, de l'autre une très grande quantité d'olive traitées par an, favorisant ainsi l'effet d'échelle. De surcroît, les systèmes 2-phases étudiés semblent présenter un faible rendement d'extraction par rapport au rendement moyen. Enfin, le processus de remplissage des bouteilles n'est pas renseigné pour le cas d'étude du système 3-phases. Or il a été montré que ce processus présentait des impacts importants. Ainsi, même si les calculs sont corrects et les conclusions qui en découlent restent logiques, il ne semble pas possible de conclure sur les seuls impacts environnementaux.

Choix de conception final

Malgré le manque d'informations sociales et économiques au niveau de l'entreprise, l'étude du système de production d'huile d'olive permet de dégager quatre scénarios à partir desquels l'étape de choix de conception ou re-conception (préliminaire ou détaillée) de l'approche P²E va pouvoir

être réalisée. Il s'agit des scénarios PBIS (presse, culture biologique, irriguée et superintensive (haie fruitière)), PCII (système 3-phases, culture conventionnelle, irriguée et intensive), 3CII (système 3-phases, culture conventionnelle, irriguée et intensive) et 3BIS (système 3-phases, culture biologique, irriguée et superintensive (haie fruitière)). Ils sont présentés avec les 5 critères finals retenus et définis dans le sous-chapitre 7.3 : l'impact environnemental, la pertinence de l'étude, l'efficacité du procédé, la viabilité économique et l'impact social. Le tableau 26 montre le tableau de bord sur lequel le choix d'un scénario peut être fait.

Tableau 26. Résultats de la durabilité des scénarios retenus

Critère final	Niveau du critère	Unité	PCII	3CII	PBIS	3BIS
Impact environnemental	3	Points environnementaux	1,3 10 ²	1,2 10 ²	1,7 10 ²	1,6 10 ²
Efficacité du procédé	2	Sans unités	Procédé à améliorer	Procédé à améliorer	Procédé à améliorer	Procédé à améliorer
Viabilité économique	2	Sans unités	Viable	Viable	Viable	Viable
Impact social	3	Points sociaux	1,7	1,7	1,7	1,7
Pertinence de l'étude	2	Sans unités	Résultats pertinents	Résultats pertinents	Résultats pertinents	Résultats pertinents

Compte tenu du manque de données et de l'incertitude sur les résultats de l'impact environnemental, il semble délicat de prendre une décision parmi ces 4 scénarios. Le tableau de bord proposé dans Olive est présenté en annexe 17.

Il convient de remarquer que le choix de l'agrégation partielle qui a été fait (sous-chapitre 7.3) favorise la prise en compte des considérations sociales et environnementale par rapport aux aspects économiques et techniques. En effet, le seul classement qui peut permettre de hiérarchiser les différents scénarios peut être réalisé uniquement avec le score environnemental et social, les autres critères étant des critères qualitatifs.

Chapitre 14. Conclusion

L'application de l'approche P²E offre un grand nombre de résultats d'analyse du système de production d'huile d'olive vierge et permet donc de fournir des éléments d'aide à la décision. Cependant, certains aspects de l'analyse et certaines limites font l'objet d'une discussion présentée dans ce chapitre.

Il ressort de l'étude de sensibilité que les paramètres incontournables sont la teneur en huile des olives (dus à la variété et aux pratiques culturales), le taux d'extraction (dû au type de technologie d'extraction), la durée de vie des infrastructures. Les résultats de l'influence des durées de vie (des infrastructures et du système) et la variation des rendements d'extraction moyens ont montré l'importance de ces paramètres sur les résultats d'AeCV et d'AcCV indépendamment les uns des autres.

Les impacts des infrastructures sont minimisés car ils ne reposent que sur les impacts de la production des matières premières qui les constituent. L'influence de leurs procédés de fabrication, de leur transport, de leur démantèlement et de leur fin de vie pourrait venir compléter le modèle de prise en compte des infrastructures. D'autre part, la part significative des infrastructures dans les impacts va à l'encontre des hypothèses habituelles trouvées dans les AeCV d'huile d'olive. En effet, elles sont en général exclues des études car supposées négligeables par rapport aux processus liés au fonctionnement du système. À la lumière des résultats de l'étude, il s'avère important de modéliser les infrastructures et les impacts qu'elles génèrent, particulièrement pour l'agro-industrie oléicole.

Les oliviers vivant plusieurs dizaines voire centaines d'années, ils immobilisent du carbone sur une durée *a priori* significative et contribueraient alors à limiter cet impact du réchauffement climatique. Les professionnels du secteur souhaiteraient ainsi que ce critère soit pris en compte dans les analyses de cycle de vie afin de ne pas pénaliser l'oléiculture par rapport aux autres cultures annuelles de plantes oléagineuses dont les rendements à l'hectare sont bien supérieurs. D'après les calculs de Sofu *et al.* (2005), les oliviers stockeraient une très grande quantité de carbone en comparaison à l'impact sur le réchauffement climatique. En effet, entre 2 ans et 7 ans de vie, l'immobilisation de carbone dans les parties permanentes des jeunes oliviers ne cessent de croître passant de 3,6 à 47 kg CO_{2eq} par arbre. Sachant qu'un arbre produit environ 15 kg d'olives par an (estimation basse), cela représente 0,24 à 3,1 kgCO_{2eq} par kg d'olives produites. Or avec l'émission d'environ 0,5 kg CO_{2eq} par kg d'olives produites lors du cycle de vie de production d'huile d'olive et en admettant que le stockage du carbone par l'arbre se stabilise à partir de la

septième année de vie, le secteur pourrait présenter un bilan carbone négatif (donc être positif pour l'environnement). Cependant, le stockage du carbone dans l'olivier en tant que solution partielle à la diminution du réchauffement climatique mérite d'être mis en perspective. Dans les modèles d'impact sur le réchauffement climatique, la durée de vie de référence dans l'atmosphère d'une molécule de dioxyde de carbone s'élève à cent années. Ainsi, pour qu'un olivier soit raisonnablement considéré comme un puits de carbone, il doit vivre sur une période strictement supérieure. Si l'actuelle tendance à produire selon une culture intensive ou superintensive se poursuit, la durée des arbres limitée à une vingtaine d'années ne suffira pas à considérer l'oléiculture comme une activité qui favorise le stockage du carbone (De Gennaro *et al.*, 2012).

Les émissions liées à la décomposition des matières fertilisantes organiques et minérales n'étant pas incluses, l'analyse minimise certaines catégories d'impacts tels que le réchauffement climatique ou encore l'eutrophisation. Pour être incluses, des émissions polluantes en question devraient être calculées à l'aide de modèles d'émissions (sous-section 4.3.2.5).

D'un point de vue social, il semblerait pertinent d'évaluer l'acceptabilité de la culture irriguée particulièrement dans les zones arides. Un manque de données sur les aspects économiques et sociaux de l'entreprise ne permet pas d'atteindre un niveau fin d'analyse de la durabilité pour ces deux aspects.

Conclusion & Perspectives

Dans un contexte de crise globalisée sur le plan social, environnemental et économique, la durabilité de l'humanité est mise en jeu et constitue explicitement un objectif à atteindre. Ce dernier repose sur la conciliation des intérêts économiques, de l'épanouissement individuel et donc social et de la préservation des écosystèmes et de la vie dans son ensemble. La complexité et l'accélération des activités humaines amènent les décideurs, quel que soit leur niveau de hiérarchie, à adopter une attitude conforme aux exigences que requiert le respect de la durabilité. En ce sens, de nombreux outils et méthodes d'aide à la décision sont élaborés depuis la fin du XX^{ème} siècle. Dans ce contexte, le projet européen OiLCA a été réalisé pour doter le secteur oléicole d'un outil d'évaluation des coûts et de l'empreinte environnementale pour la mise en place d'une éco-étiquette pour améliorer la durabilité des entreprises du secteur. Les outils et méthodes développés dans le cadre de ce projet ont été formalisés dans cette thèse dont l'objectif visait à proposer une approche d'évaluation de la durabilité des systèmes guidée par la pensée cycle de vie puis une application à l'agro-industrie oléicole. Cette partie dresse un bilan de cette thèse puis en présente les perspectives.

Partie A.

La première partie avait pour but de réaliser un état de l'art sur la durabilité et ses outils, l'ingénierie d'entreprise et l'agro-industrie oléicole. À l'issue de cette analyse de la littérature, en dépit des débats autour du concept, la durabilité s'est révélée comme l'objectif incontournable du XXI^{ème} siècle. Pour servir cet objectif, la pensée cycle de vie et les outils qui en dérivent sont apparus comme des moyens privilégiés d'aborder la conception de systèmes durables. En tant que système sociotechnique de systèmes jouant un rôle essentiel dans la conception de systèmes durables, l'entreprise a été présentée via l'ingénierie d'entreprise basée sur les modèles qui fournit des outils formels de modélisation de systèmes. Finalement, l'agro-industrie oléicole a été étudiée à la lumière de la durabilité de manière à faire émerger les manques et les attentes. Six verrous scientifiques majeurs ont pu être identifiés qui portaient sur l'évaluation de la durabilité des systèmes.

VI. Comment résoudre le problème de l'intégration des volets environnemental, économique et social de l'ACV pour aboutir à une AdCV ?

V2. Est-il possible d'intégrer d'autres méthodes d'évaluation pour construire une méthode d'évaluation de la durabilité d'un système ?

V3. Comment l'analyse multicritère peut-elle aider à combiner les indicateurs hétérogènes des méthodes d'évaluation issus des différents volets de la durabilité ?

V4. En présumant que les outils de l'ingénierie d'entreprise et des systèmes puissent être appliqués à un système agro-industriel, comment peuvent-ils aider à le modéliser ?

V5. Comment la durabilité et son évaluation peuvent-elles être systématiquement intégrées dans les modèles d'une entreprise et orienter les décisions stratégiques ?

V6. Comment les différents modèles qui constituent le modèle d'une entreprise peuvent-ils être couplés ?

Partie B.

La partie B a été consacrée à répondre à ces six verrous scientifiques par six propositions qui mènent à l'approche procédé-produit-entreprise (P²E).

P1. Intégrer les volets environnemental, économique et social de l'ACV par la réalisation d'un inventaire unique puis par une analyse multicritère.

P2. Pour élargir l'approche produit de l'ACV, il est proposé d'une part de modéliser l'entreprise et le procédé et d'autre part de coupler systématiquement une évaluation économique de l'entreprise.

P3. L'analyse multicritère peut permettre de considérer différents critères. La proposition consiste à formaliser les critères caractérisés par la méthode grâce aux outils de l'analyse multicritère.

P4. Bien qu'un système agro-industriel comporte une phase de son cycle de vie qui relève de phénomènes biologiques (agronomiques), il s'agit cependant de système et de processus. Afin de formaliser les modèles de tels systèmes, les concepts de l'ingénierie d'entreprise et de l'ingénierie système sont appliqués.

P5. La durabilité peut être systématiquement intégrée dans les processus de décision en intégrant des modèles d'évaluation aux modèles du système. Un nouvel agent intégrateur est proposé qui facilite et coordonne l'intégration du concept de durabilité à tous les niveaux de décision. Il est

proposé une approche structurante de six étapes. Cette approche guidée par la pensée cycle de vie est étendue au processus de décision de manière à mettre en exergue son intégration concrète dans les décisions.

P6. Il est finalement proposé de coupler les différents modèles du système « procédé-produit-entreprise » par la définition d'une première ontologie.

Après avoir justifié de la nécessité de l'approche P²E, une caractérisation formelle de l'approche a été proposée en deux temps : un premier temps où l'approche générique a été caractérisée (applicable quel que soit le système), un second temps dédié à la caractérisation de l'approche partielle (applicable aux systèmes agro-industriels). La fin de la partie B a consisté à présenter l'implémentation de l'approche dans la solution logicielle &cOlive.

L'approche P²E s'inscrit dans un processus de décision. Elle est centrée sur l'évaluation de la durabilité d'un système procédé-produit-entreprise. La pensée cycle de vie a guidé la conception de l'approche. En effet, la structure globale de l'approche est dérivée de la structure de la méthode d'analyse de cycle de vie. Elle est constituée de six étapes. L'approche P²E s'applique non seulement aux phases de conception préliminaire et détaillée dans le cas d'une conception ou d'une reconception, mais aussi à la phase d'opération dans le cas d'une action de communication.

Le modèle de l'approche a été établi à partir des modèles des systèmes et des modèles d'évaluation des systèmes (internes et externes). L'approche repose sur deux axes d'intégration qui répondent directement aux verrous scientifiques : un axe systémique et un axe d'interaction. Le premier caractérise l'intégration du procédé, du produit et de l'entreprise. Le second caractérise le volet environnemental, social et économique. D'un point de vue informationnel, les types de données qui transitent tout au long de la mise en œuvre de l'approche ont été formalisés, révélant une complexité certaine dans le modèle d'information de l'approche.

Pour formaliser et évaluer les interactions entre le système et son environnement extérieur, les vues d'interfaces ont été introduites pour compléter les vues internes propres au système. Par cette formalisation, l'intégration des volets économiques, environnementaux et sociaux de l'évaluation de la durabilité a pu être facilitée.

En outre, bien que la structure de P²E soit légèrement différente de celle de l'ACV, elle s'en rapproche suffisamment pour pouvoir mettre en évidence que l'AdCV est réalisée ici par l'intégration de l'AeCV, de l'AcCV et de l'AsCV au niveau des étapes de modélisation du système, de l'inventaire des données et de l'évaluation multicritère. C'est donc directement par l'approche procédé-produit-entreprise que l'évaluation intégrée de la durabilité devient possible.

En effet, chacun des systèmes « procédé », « produit » et « entreprise » étant en interaction avec chacun des trois volets de la durabilité, en intégrant les trois systèmes, les volets étaient intégrés de fait. C'est donc dans l'extension du modèle de produit aux modèles de procédé et d'entreprise que l'intégration des volets sociaux, économiques et environnementaux a pu se faire.

L'approche repose sur la modélisation du système « procédé-produit-entreprise ». À cet effet, elle s'appuie sur une intégration fédérée des modèles de procédé, de produit et d'entreprise. L'intégration des modèles de procédé, de produit et d'entreprise a été facilitée par l'utilisation du cadre formel de modélisation d'entreprise notamment par les différentes vues internes qu'il propose sur le système. Ces travaux de thèse ont également montré qu'une telle intégration au niveau sémantique était possible dans la mesure où de nombreux concepts étaient communs aux trois modèles étudiés. Une première ontologie a été proposée pour formaliser et capitaliser les connaissances liées à l'approche P²E.

L'approche partielle appliquée au secteur agro-industriel précise et généralise le système à étudier. Ainsi, un modèle de système agro-industriel a été établi, basé sur deux sous-systèmes « entreprise » (agricole et industriel), deux sous-systèmes « produit » (matière biologique brute et transformée) et un système « procédé » qui transforme la matière biologique brute en matière biologique transformée.

D'un point de vue fonctionnel et des ressources, un nouvel acteur de l'entreprise a été introduit pour mettre en œuvre l'approche P²E : l'ingénieur en durabilité des systèmes. Il joue le rôle de facilitateur et d'intégrateur des modèles et des systèmes en vue de leur évaluation.

Au niveau des différents modèles d'évaluation, l'évaluation multicritère a été présentée et reste au cœur de l'approche P²E. Par essence, l'évaluation multicritère agrège et donc, d'une certaine manière, intègre les critères d'évaluation.

L'implémentation de l'approche P²E dans l'outil Olive dédié à la production d'huile d'olive vierge permet d'illustrer, par un exemple concret de système agro-industriel, la mise en œuvre de l'approche partielle qui dérive de l'approche générique. L'outil Olive étant structuré par la formalisation de l'approche partielle, il est supposé pouvoir être adapté à un autre système agro-industriel par un expert.

En termes de conception durable, l'approche générique P²E se place dans une perspective de durabilité faible ou forte. En revanche, l'approche partielle appliquée à l'agro-industrie et proposée dans cette partie vise la durabilité forte par le choix d'un niveau d'agrégation partielle des trois critères de la durabilité (environnemental, social et économique). Par rapport aux six dimensions

de la conception durable proposées par Gagnon *et al.* (2012), (i) l'approche P²E ne propose pas de structure du processus de conception, (ii) elle couvre les trois volets de la durabilité, (iii) elle fait appel à des indicateurs qui caractérisent l'environnement, la société et l'économie *a priori* pertinents ; (iv) avec une incertitude située entre 20 % et 30 %, l'approche P²E implémentée dans l'outil Olive présente une précision de l'ordre de celle qui pourrait être attendue dans des phases de conception préliminaire ou détaillée ; (v) théoriquement, l'approche P²E offre la possibilité d'évaluer plusieurs alternatives dont les améliorations escomptées se situent au niveau d'une augmentation de la durabilité du système à concevoir ou reconcevoir par comparaison des différentes alternatives ; (vi) l'approche P²E s'inscrit dans un processus de décision par sa structure même, bien que l'étape de choix ne soit pas formalisée.

Partie C.

La troisième et dernière partie consistait, d'une part en l'application de l'approche P²E en vue de sa validation sur un cas réel et, d'autre part, en l'évaluation de la durabilité de la production d'huile d'olive vierge en France. Les quatre chapitres de cette ultime partie reprenaient les six étapes de l'approche P²E, à savoir la définition des objectifs et du champ de l'étude, la modélisation du système de production d'huile d'olive, l'inventaire des données. Le quatrième chapitre de cette partie rassemblait les trois dernières étapes de l'approche P²E.

L'évaluation de la durabilité de la production d'huile d'olive a été appliquée à des entreprises réelles de l'agro-industrie oléicole. Par conséquent, l'application de l'approche P²E à ce secteur avait vocation à aider les décideurs dans un choix de re-conception et/ou à leur fournir des résultats d'évaluation de la durabilité de leur système afin de les communiquer aux clients.

La modélisation du système et le nombre des entreprises participantes ont permis d'établir 19 scénarios pour le système de production d'huile d'olive vierge basés sur 6 pratiques culturales et 3 procédés d'extraction. Les choix de conception ont été proposés sur la base de ces scénarios. L'inventaire a permis de récolter des données brutes, des données simulées et des données d'expert. Elles ont été complétées par des données de bases de données. Les données qualitatives ont été transformées en données semi-quantitatives en respectant la méthode de transformation des données présentée dans la partie B. Par ailleurs, toutes les données d'entrée ont été soumises à une analyse de la qualité puis à un calcul de l'incertitude conforme à la proposition de l'approche partielle. Une incertitude moyenne de 23 % a été calculée. Sa propagation par une simulation de Monte Carlo à travers l'évaluation des impacts environnementaux a abouti à une incertitude médiane de 27 % sur les résultats d'impacts intermédiaires.

L'évaluation de la durabilité en tant que telle a reposé entièrement sur les modèles d'évaluation caractéristiques de l'approche partielle. Elle a permis d'aboutir à un grand nombre de résultats d'analyse de la durabilité du système de production d'huile d'olive vierge. Les deux axes de l'approche (systémique et de la durabilité) ont structuré l'interprétation et l'analyse pour fournir des éléments d'aide à la décision.

L'analyse du système moyen de production d'huile d'olive vierge a fait ressortir la prépondérance de la phase de production des olives en termes d'impacts sur l'environnement et de coût du cycle de vie. L'impact environnemental des infrastructures s'est révélé significatif (9 % en moyenne et à partir d'un modèle très simplifié des infrastructures qui minimise leurs impacts). Un tel résultat va à l'encontre des hypothèses habituelles utilisées dans les AeCV d'huile d'olive. En effet, les infrastructures sont en général exclues des études car supposées négligeables par rapport aux processus opérationnels du système. Si une telle hypothèse est valide dans d'autres filières agro-industrielles, elle mérite d'être reconsidérée pour la filière oléicole à cause de les faibles besoins énergétiques et matériels de l'extraction de l'huile d'olive.

D'un point de vue social, un manque de données sur les aspects économiques et sociaux au niveau de l'entreprise ne permet pas d'atteindre un niveau fin d'analyse de la durabilité pour ces deux aspects. Néanmoins, sur la base des données récoltées, les entreprises du système montrent un respect des parties prenantes élevé. Enfin, l'évaluation interne de l'entreprise moyenne s'est révélée positive dans la mesure où tous les indicateurs économiques internes satisfont à la condition de viabilité économique. L'intérêt de l'intégration des modèles de procédé, de produit et d'entreprise réside également dans la possibilité d'étudier l'influence des paramètres sensibles à travers une étude de sensibilité. Les paramètres dits sensibles sont la teneur en huile des olives (due à la variété et aux pratiques culturales), le taux d'extraction (dû au type de technologie d'extraction) et la durée de vie des infrastructures. Les résultats de l'influence des durées de vie (des infrastructures et du système) et la variation des rendements moyens d'extraction ont montré l'importance de ces paramètres sur les résultats d'évaluation de la durabilité.

Finalement, un tableau de résultats de l'évaluation de la durabilité offre une comparaison des 4 scénarios les plus durables afin de mettre en œuvre le processus de choix de conception final. Les incertitudes des résultats et les manques de données économiques et sociales de l'entreprise limitent la finesse des résultats finals.

Le tableau 27 reprend les verrous scientifiques soulevés, les solutions proposées pour les lever ainsi que l'état de réalisation des propositions faites au cours de cette thèse.

Tableau 27. Verrous, propositions et état actuel

Verrou	Proposition	État de la proposition à la fin de cette thèse
V1.	P1.	E1. Réalisée
V2.	P2.	E2. En partie réalisée : le modèle de procédé ne repose que sur un bilan matière et le modèle d'entreprise est en boîte grise.
V3.	P3.	E3. Réalisée.
V4.	P4.	E4. En partie réalisée : une ontologie de domaine pourrait venir compléter et formaliser davantage.
V5.	P5.	E5. En partie réalisée : le processus d'aide à la décision n'est pas formalisé ni détaillé.
V6.	P6.	E6. En partie réalisée : la première ontologie proposée ne contient pas explicitement d'axiomes et toutes les relations ne sont pas explicitées.

Cette thèse et les réponses qu'elle a apportées aux verrous scientifiques soulevés présentent des limites qui ouvrent la voie à de futurs travaux de recherche et développement.

Perspectives

La première ontologie de l'approche en tant que capitalisation des connaissances et formalisation des informations nécessaires à l'évaluation guidée par la pensée cycle de vie offre la perspective d'une ontologie complète qui inclurait celle de l'ACV.

En ce qui concerne les modèles et leur niveau de caractérisation, le modèle d'entreprise en boîte grise pourra passer progressivement à un modèle en boîte blanche par l'intégration des modèles des systèmes de pilotage, opérants, d'évaluation et d'information. Par ailleurs, la formalisation des contraintes et des spécifications des besoins permettra d'améliorer l'alignement des choix avec les contraintes de tous les niveaux de décision et la stratégie de l'entreprise. Le modèle de procédé pourra être complété et sa vraisemblance renforcée par des analyses énergétiques, exergétiques ou émergétiques. Le modèle de produit pourrait être affiné par l'extension des limites du cycle de vie et par la précision des processus élémentaires.

Du fait que les émissions liées à la décomposition des matières fertilisantes organiques et minérales ainsi que le stockage du carbone dans les arbres ne sont pas inclus, l'analyse minimise certaines catégories d'impacts tels que le réchauffement climatique ou encore l'eutrophisation. Pour être incluses, les émissions polluantes en question devraient être calculées à l'aide de modèles d'émissions.

L'approche P²E couple les modèles de procédé, produit et entreprise. Or un couplage entre des modèles de molécule, de procédé et d'entreprise a commencé à émerger avec les travaux de Heintz *et al.* (2014). Ainsi, une approche molécule-procédé-produit-entreprise (MP²E) se dessine pour compléter l'intégration des différentes approches de conception.

L'approche P²E étant particulièrement dédiée à la conception, son couplage avec des outils d'optimisation multiobjectifs pour l'aide à la décision s'impose naturellement. Un couplage sémantique peut même être envisagé de manière à intégrer systématiquement cette étape d'optimisation. Parallèlement, la modélisation de l'étape de choix du processus de décision devra être approfondie, soit par la sélection d'une méthode existante, soit par l'invention d'une technique. Compte tenu de la complexité de la prise de décision liée à la multiplicité des points de vue et des différentes expertises, une idée serait de se tourner vers la prise de décision collaborative (*collaborative decision making*).

Un des problèmes de l'ACV réside dans sa précision, notamment celle des données qu'elle utilise. La formalisation des données d'ACV et de leur nature peut servir à puiser des données plus précises dans les travaux scientifiques et les publications qui en diffusent les résultats utilisables en ACV. À cet effet, le projet 3BCAR IC2ACV (Méthodologie de couplage des approches d'ingénierie des connaissances et analyse de cycle de vie) en collaboration avec le laboratoire IATE de Montpellier a été monté et s'inscrit dans le prolongement de ces travaux de thèse.

Références

- Abiola, A., Fraga, E.S., Lettieri, P., 2010. Multi-Objective Design for the Consequential Life Cycle Assessment of Corn Ethanol Production, in: Pierucci, S., Ferraris, B.G. (Eds.), 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier Science Bv, Amsterdam, Pays Bas. pp. 1309–1314.
- Académie Française, 2013. Académie Française. <http://www.academie-francaise.fr/> (dernier accès le 10 janvier 13).
- Ademe, 2013. Ressources naturelles. MtaTERRE. <http://www.mtaterre.fr> (dernier accès le 13 janvier 2013)
- AFIS, (Association Française de l'Ingénierie Système), 2004. Glossaire de base de l'Ingénierie système. Afis.
- AFIS, (Association Française de l'Ingénierie Système), 2009. Découvrir et comprendre l'ingénierie système - version expérimentale 3.
- Afnor, 1997. Management par la valeur: coût global, 1^{ère} ed. Afnor, Paris, France.
- André, P., Delisle, C.E., Revéret, J.-P., 2007. L'évaluation des impacts sur l'environnement: Processus, acteurs et pratique pour un développement durable, 2^{nde} ed. Presses Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada. p 522. ISBN 978-2-553-01132-0.
- Audsley, E., Alber, S., Europäische Gemeinschaften, 1997. Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture. European Comm., DG VI Agriculture.
- Avraamides, M., Fatta, D., 2006. TASK 3.2 Implementation of Life Cycle Inventory in Lythrodontas region of Cyprus (No. 3.2). Laboratory of Environmental Engineering, University of Cyprus, Nicosia, Chypre.
- Avraamides, M., Fatta, D., 2008. Resource consumption and emissions from olive oil production: a life cycle inventory case study in Cyprus. *J. Clean Prod.* 16, 809–821.
- Azapagic, A., 1999. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chem. Eng. J.* 73, 1–21.
- Azapagic, A., Millington, A., Collett, A., 2006. A Methodology for Integrating Sustainability Considerations into Process Design. *Chem. Eng. Res. Des* 84, 439–452.
- Bauer, P.E., Maciel Filho, R., 2004. Incorporation of environmental impact criteria in the design and operation of chemical processes. *Braz. J. Chem. Eng.* 21, 405–414.
- Bécaert, V., Bernier, E., Clément, E., Lesage, P., Samson, R., Rosenbaum, R., Amor, B., 2010. Conception environnementale et cycle de vie, 3^{ème} ed, Presses internationales. Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada. p 21. ISBN : 978-2-553-01490-1.
- Bellini, B., Janin, M., 2011. Ecoconception : état de l'art des outils disponibles. Dossier Techniques de l'ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/strategies-de-conception-pour-l-innovation-42127210/ecoconception-etat-de-l-art-des-outils-disponibles-g6010>.

- Ben Mena, S., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, Les presses agronomiques de Gembloux 2, 83–93.
- Benoît-Norris, C., Norris, G., 2012. Social Hotspots Database (SHDB). <http://socialhotspot.org/> (dernier accès 21 février 2014).
- Bigand, M., Bourey, J.P., Perry, N., Mauchand, M., 2007. Case studies in model integration. *International J. Comput. Integr. Manuf.* 20, 619–626.
- Bimbinet, J.-J., 1998. Bases conceptuelles du génie des procédés agroalimentaires. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/genie-industriel-alimentaire-42469210/bases-conceptuelles-du-genie-des-procedes-agroalimentaires-f1000>.
- Botreau, R., Veissier, I., 2013. Évaluation globale de la durabilité Démarches, difficultés et application à l'évaluation du bien-être des vaches laitières. Séminaire annuel de la plateforme MEANS le 5 septembre 2013, Rennes, France.
- Bouwman, A.F., 1998. Compilation of a global inventory of emissions of Nitrous Oxide. University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands. p 150.
- Brandenburg, H., Wojtyna, J.-P., 2003. Identifier et décrire les processus de réalisation, in : *L'approche processus, mode d'emploi*. Editions d'Organisation, p. 144. ISBN : 2-7081-2888-4
- Brenttrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Kuhlmann, H., 2000. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *Int. J. LCA.* 5, 349–357.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Clarens, F., Espi, J.J., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2012a. Life Cycle Assessment of olive oil production in France, in: *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation*. A. Nizhou & F. Castro ed, Porto, Portugal, pp. 987–992.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Clarens, F., Espi, J.J., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2012b. Life cycle assessment of treatment processes of solid waste from the olive oil sector. 8th International Conference on Renewable resources and biorefineries le 2 juin 2012, Toulouse, France.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., s.d. Life cycle assessment of olive oil: a literature review. *Int. J. Life Cycle Assess.* (Soumis)
- Busset, G., Belaud, J.-P., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2012c. Influence de la durée de vie d'un système agro-industriel sur les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie. Symposium ECOTECHS'2012 Evaluation environnementale et ACV : quels usages par les acteurs publics et privés ? Le 25 octobre 2012, Montoldre, France.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2012d. Approche intégrée dirigée par les modèles pour l'écoconception des procédés agro-industriels: étude de la production d'huile d'olive. Journée nationale GDR MACS/STP - EASY-DIM, le 29 mars 2012, Albi, France.

- Busset, G., Belaud, J.-P., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2013a. Life cycle analysis : Reminder and application to olive oil production. Symposium on ecoinnovation in the SUDOIE region, le 5 juin 2013, Toulouse, France.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2013b. Écoconception des agro-procédés: application à la production d'huile d'olive. XIV^{ème} congrès de la Société Française de Génie des Procédés, le 8 octobre 2013, Lyon, France.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Montréjaud-Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2014. Integrated approach for agro-process design guided by sustainability evaluation: application to the olive oil production. 5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, le 29 août 2014, Rio de Janeiro, Brésil.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Sablayrolles, C., Montréjaud-Vignoles, M., Le Lann, J.M., 2012e. Approche intégrée dirigée par les modèles pour l'éco-conception des procédés agro-industriels: étude de la production d'huile d'olive. Forum Académie-Industrie AFIS, le 29 novembre 2012, Palaiseau, France.
- Busset, G., Belaud, J.-P., Vignoles, M., Sablayrolles, C., 2013c. An Integrated Approach for Designing an Agricultural Process Guided by sustainable Evaluation: Application to Olive-Oil Production. INSIGHT 16, 32–34.
- Busset, G., Sablayrolles, C., Montréjaud-Vignoles, M., Capiscol, C., Fernandez-Cuevas, C., De Toro Navero, C., Trillo, R., Rovira, M., Clarens, F., Espi, J.J., Garza, J., Carvalho, J., Araujo, J., Chacon, L., Delgado, F., 2011. OilCA project: enhancing competitiveness and reducing carbon footprint of olive oil processes through waste management optimisation using life cycle assessment. ECOTECH'S & TOOLS, le 30 novembre 2011, Montpellier, France.
- Busset, G., Sablayrolles, C., Montréjaud-Vignoles, M., Capiscol, C., Fernandez-Cuevas, C., De Toro Navero, C., Trillo, R., Rovira, M., Clarens, F., Espi, J.J., Garza, J., Carvalho, J., Araujo, J., Chacon, L., Delgado, F., 2012f. L'étiquetage environnemental, l'empreinte carbone et la production d'huile d'olive. Techno'huile : « Qualité des huiles d'olive : nouveaux indicateurs chimiques et contaminants », le 1^{er} juin 2012, Montpellier, France.
- Caillet, R., 2003. Analyse multicritère: étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie, Série Scientifique. ed. CIRANO, Montréal, Québec, Canada. p 52. ISBN : 1198-8177.
- Chokron, M., Des Rochers, M., 2000. Une démarche de conception d'un modèle générique. Cahier du GReSI. Ed. Ecole des Hautes Etudes Commerciales de Montréal Montréal, Québec, Canada. p 80. ISSN : 0832-7203
- Cinar, O., Alma, M.H., 2008. Environmental assessment of olive oil production: Olive oil mill wastes and their disposal, in: Ozkaya, M.T., Lavee, S., Ferguson, L. (Eds.), Proceedings of the Fifth International Symposium on Olive Growing. Presented at the Fifth International Symposium on Olive Growing, International Society Horticultural Science, Leuven, Belgique, pp. 645–649.
- Cinelli, M., Coles, S.R., Jørgensen, A., Zamagni, A., Fernando, C., Kirwan, K., 2013. Workshop on life cycle sustainability assessment: the state of the art and research needs—November 26, 2012, Copenhagen, Denmark. Int J Life Cycle Assess 18, 1421–1424.

- CMED, (Commission Mondiale sur l'environnement et le développement), 1987. Notre avenir à tous (Rapport Brundtland). Organisation des Nations Unies. Nairobi, Kenya. p 349.
- CNRTL, (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales), 2013. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. <http://www.cnrtl.fr/> (dernier accès le 21 février 2014).
- COI, (Conseil International Oléicole), 2011. Norme commerciale applicable à l'huile d'olive et à l'huile de grignons d'olive. COI/T.15/NC n° 2/Rév. 10
- COI, (Conseil Oléicole International), 2012a. Consommation mondiale d'huile d'olive. <http://www.internationaloliveoil.org/documents/viewfile/4190-consommation1>
- COI, (Conseil Oléicole International), 2012b. Production mondiale d'huile d'olive. <http://www.internationaloliveoil.org/documents/viewfile/4244-production1-ang>
- COI, (Conseil Oléicole International), 2012c. Glossaire. International Olive Council. http://www.internationaloliveoil.org/glosario_terminos/index?lang=fr_FR (dernier accès 12.17.12).
- Commission Européenne, 2002. The olive oil sector in the European Union (Fact Sheet No. KF-44-02-084-EN-D). European Commission, Brussels, Belgium.
- Cortes, J.M., 2006. TASK 3.3 Implementation of Life Cycle Inventory in Ribera Baja (Navarra, Spain) (No. 3.3). Fundacion LEIA Environment and energy unit, Cordoba, España.
- Coullet-Demaizière, C., 2010. Au-delà de l'écologie - Développement durable, Afnor Editions. ed. Afnor, Saint-Denis-la-Plaine, France. p 362. ISBN : 978-2-12-465252-5.
- Couture, J.-M., 2013. Analyse Sociale du Cycle de Vie: réflexions méthodologiques sur la base d'un cas pratique. Séminaire annuel de la plateforme MEANS le 5 septembre 2013, Rennes, France.
- CTO, (Centre Technique de l'Olivier), 2011. Infolive spécial - produits phytosanitaires utilisables par les oléiculteurs professionnels.
- De Gennaro, B., Notarnicola, B., Roselli, L., Tassielli, G., 2012. Innovative olive-growing models: an environmental and economic assessment. *J. Clean Prod.* 28, 70–80.
- De Rosnay, J., 1977. Le microscope, Points essai. Points, Paris. p 320. ISBN : 2020045672.
- Debauche, B., Mégard, P., 2004. BPM business Process Management, pilotage métier de l'entreprise, Hermes Science publications. ed, Management et informatique. Lavoisier, Paris, France. p 212. ISBN : 2-7462-0852-0.
- Dessane, D., 2003. Energy efficiency and life cycle analysis of organic and conventional olive groves in the Messara Valley, Crete, Greece. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Dreyer, L.C., Hauschild, M.Z., Schierbeck, J., 2006. A framework for social life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 11, 88–97.
- Earles, J.M., Halog, A., 2011. Consequential life cycle assessment: a review. *Int. J. Life Cycle Assess.* 16, 445–453.

- ECETOC, (European Center for Ecotoxicology and Toxicology Of Chemicals), 2000. Ammonia emissions to air in Western Europe (Technical Report No. 62). European Chemical Industry Ecology & Toxicology Centre, Brussels, Belgium.
- Eggenberger, M., Partidário, M.R., 2000. Development of a framework to assist the integration of environmental, social and economic issues in spatial planning. *Imp. Assess. Project Appraisal* 18, 201–207.
- El Hajjouji, H., 2007. Evolution des caractéristiques physico-chimiques, spectroscopiques et écotoxicologiques des effluents d’huileries d’olive au cours de traitements biologique et chimique. Institut Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France
- EPD, 2010. PCR Virgin oil and its fractions (Product Category Rules No. 1.0). EPD International. p 18.
- EPD, 2012a. Environmental Product Declaration for one pack of 0.75 Litre of extra virgin olive oil (EPD No. 1.0). EPD International. p 17.
- EPD, 2012b. Dichiarazione ambientale di prodotto: olio extra vergine di oliva “denociolato” (confezione da 1 litro) (Environmental Product Declaration No. 1.0). EPD International, Orta Nova, Italia. p 16.
- Espi, J.J., Clarens, F., Busset, G., Sablayrolles, C., Vignoles, M., Carvalho, J., Fonseca, B., Delgado, F., Chacon, L., Capiscol, C., Trillo, R., 2013. Informe sobre el análisis de ciclo de vida y costes según los requisitos establecidos por la norma ISO 14040: Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (Analyse de cycle de vie avec révision critique No. 2). *OiLCA*, Manresa. p. 152.
- European Environment Agency, 2006. Emission inventory Guidebook B810vs3.2 (Guide No. B810vs3.2). European Environment Agency, Thessaloniki, Greece. p 48. <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEP/CORINAIR5/B810vs3.2.pdf>
- Finkbeiner, M., Schau, E.M., Lehmann, A., Traverso, M., 2010. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability* 2, 3309–3322.
- Finnveden, G., Moberg, Å., 2005. Environmental systems analysis tools – an overview. *Journal of Cleaner Production* 13, 1165–1173.
- Fiore, M., Breedveld, L., Arrivas Bajardi, C., Giaimo, L., Notaro, A., 2009. Certificazione ambientale di prodotti agroalimentari: LCA dell’olio d’oliva. *Ambiente* 12–20.
- Foolmaun, R.K., Ramjeeawon, T., 2013. Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 155–171.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., Wernet, G., 2007. Overview and Methodology (Ecoinvent Report No. 1), Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Suisse. p 77.
- Gagnon, B., Leduc, R., Savard, L., 2012. From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. *J. Eng. Des.* 23, 49–74.

- Gasafi, E., Meyer, L., Schebek, L., 2003. Using Life-Cycle Assessment in Process Design. *Journal of Industrial Ecology* 7, 75–91.
- Georgiou, K., Mentzis, A., Papadopoulos, A., Vageloglou, V., Papadakis, G.A., 2006. TASK 3.1 Implementation of Life Cycle Inventory in Voukolies /Polemarchi region of Crete (No. 3.1). Technical University of Crete, Crete, Greece. p 132.
- Ghedira, K., 2008. L'olivier. *Phytothérapie* 6, 83–89.
- Gillani, S., Sablayrolles, C., Belaud, J.-P., Montréjaud-Vignoles, M., Le Lann, J.-M., 2011. Assessment of *Jatropha Curcas* bioprocess for fuel production using LCA and CAPE. *Computer Aided Chemical Engineering* 29, 1341–1345.
- Gillani, S.T., 2013. A life cycle assessment and process system engineering integrated approach for sustainability : application to environmental evaluation of biofuel production. Université de Toulouse, Toulouse, France. p 276.
- Gillani, S.T., Belaud, J.-P., Sablayrolles, C., Vignoles, M., Le Lann, J.-M., 2010. Review of Life Cycle Assessment in Agro-Chemical Processes 5, p 29. ISSN : 1934-2659.
- Gruber, T.R., 1995. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? 43, 907–928.
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T., 2011. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future†. *Environ. Sci. Technol.* 45, 90–96.
- Guzman, G.I., Alonso, A.M., 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. *Agric. Syst.* 98, 167–176.
- Hallstedt, S., Ny, H., Robert, K.-H., Broman, G., 2010. An approach to assessing sustainability integration in strategic decision systems for product development. *J. Clean Prod.* 18, 703–712.
- Hauschild, M., 2000. Estimating pesticide emission for LCA of agricultural products, in: *Agricultural Data for Life Cycle Assessment*. Agricultural Economics Research Institute, The Hague, The Netherlands, p. 155.
- Hauschild, M.Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M., Schryver, A.D., Humbert, S., Laurent, A., Sala, S., Pant, R., 2012. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess* 1–15.
- Heintz, J., 2012. Systemic approach and decision process for sustainability in chemical engineering: Application to computer aided product design. Université de Toulouse, Toulouse, France. p 273.
- Heintz, J., Belaud, J.-P., Gerbaud, V., 2014. Chemical enterprise model and decision-making framework for sustainable chemical product design. *Comput. Ind.* 65, 505–520.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K., 1996. The Science of climate change; contribution of WGI to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, *Climate Change*. ed. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain. p 588.

- Hsu, C.-W., Wang, S.-W., Hu, A.H., 2013. Development of a New Methodology for Impact Assessment of SLCA, in: Nee, A.Y.C., Song, B., Ong, S.-K. (Eds.), *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer Singapore, pp. 469–473.
- INRS, (Institut National de Recherche et de Sécurité), 2004. *Le point des connaissances sur ... Les phtalates*.
- ISO, (International Organisation for Standardisation), 1999. ISO 15704 - Industrial automation systems — Requirements for enterprise-reference architectures and methodologies (Norme). International Organisation for Standardisation (ISO), Genève, Suisse.
- ISO, (International Organisation for Standardisation), 2006a. ISO 14040 - Environmental Management – Life Cycle Assessment Principles and Framework. International Organisation for Standardisation (ISO), Genève, Suisse.
- ISO, (International Organisation for Standardisation), 2006b. ISO 14044 - Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Organisation for Standardisation (ISO) , Genève, Suisse.
- ISO, (International Standard Organisation), 2002. ISO14062 - Environmental management — Integrating environmental aspects into product design and development (Norme), Genève, Suisse.
- ISO, (International Standard Organisation), 2005. ISO 9000 - Systèmes de management de la qualité Principes essentiels et vocabulaire. International Organisation for Standardisation (ISO) , Genève, Suisse.
- Jacquemin, L., 2012. *Production d’hémicelluloses de pailles et de sons de blé à une échelle pilote Etude des performances techniques et évaluation environnementale d’un agro-procédé*. Université de Toulouse, Toulouse, France. p 345.
- Jacquemin, L., Pontalier, P.-Y., Sablayrolles, C., 2012. Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 1028–1041.
- Jézéquel, J.-M., Combemale, B., Vojtisek, D., 2012. *Ingénierie dirigée par les modèles - des concepts à la pratique*, Ellipses. ed, *Références sciences*. Ellipses, Paris, France. p 122. ISBN : 978-2-7298-71963.
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., 2005. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. 1^{ère} ed, *Sciences et Techniques de l’environnement*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse. p 242. ISBN : 2-88074-568-3.
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., Shaked, S., 2010. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*, 2^{nde} ed, *Sciences et Techniques de l’environnement*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse. p 302. ISBN : 978-2-88074-886-9.
- Jorgensen, A., Finkbeiner, M., Jorgensen, M.S., Hauschild, M.Z., 2010. Defining the baseline in social life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 15, 376–384.
- Jounot, A., 2004. *Le développement durable*, Afnor éditions. ed, *100 questions pour comprendre et agir*. Afnor, Saint-Denis-la-Plaine, France. p 160. ISBN : 2-12-475074-7.
- Kaltsas, A.M., Mamolos, A.P., Tsatsarelis, C.A., Nanos, G.D., Kalburtji, K.L., 2007. Energy budget in organic and conventional olive groves. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122, 243–251.

- Klatt, K.-U., Marquardt, W., 2009. Perspectives for process systems engineering—Personal views from academia and industry 33, 536–550.
- Klöpffer, W., 2008. Life cycle sustainability assessment of products. *Int J Life Cycle Assess* 13, 89–95.
- Kroeze, C., Bogdanov, S., 1997. Application of two methods for N₂O emission estimates to Bulgaria and the Netherlands. *Idojarás* 101, 239–260.
- Larousse, 2013. Larousse dictionnaire. Larousse dictionnaire. <http://www.larousse.fr/> (dernier accès 21 février 2014).
- Le Duigou, J., 2010. Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue - application aux PME mécaniciennes. Ecole centrale de Nantes, Nantes, France. p. 172.
- Le Moigne, J.-L., 1994. La théorie du système général - Théorie de la modélisation, 2nd ed, Les classiques du réseau intelligence et complexité. Édition Presse Universitaire Française. p 360. ISBN : 2130465153.
- Lehmann, A., Zschieschang, E., Traverso, M., Finkbeiner, M., Schebek, L., 2013. Social aspects for sustainability assessment of technologies—challenges for social life cycle assessment (SLCA). *Int J Life Cycle Assess* 18, 1581–1592.
- Leverge, S., 2011. Données sur la culture des olives. Entretien le 11 juillet 2011, Aix-en-Provence, France.
- Li, C., Zhang, X., Zhang, S., 2006. Environmental Benign Design of DMC Production Process 84, 1–8.
- Loiseau, E., Junqua, G., Roux, P., Bellon-Maurel, V., 2012. Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods. *J. Environ. Manage.* 112, 213–225.
- Loiseau, E., Roux, P., Junqua, G., Maurel, P., Bellon-Maurel, V., 2013. Adapting the LCA framework to environmental assessment in land planning. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1533–1548.
- Mancebo, F., 2010. Le Développement durable, 2nd ed, Collin U. Armand Collin, Paris, France. p 322.
- Mauborgne, P., Deniaud, S., Levrat, E., Micaëlli, J.-P., Bonjour, E., Lamothe, P., Loise, D., 2013. Towards a Safe Systems Engineering. *INSIGHT* 16, 21–22.
- MEEDDAT, (Ministère de l'écologie, de l'environnement du développement durable et de l'aménagement du territoire), 2009. Calcul du Coût Global; Objectifs, méthodologie et principes d'application selon la norme ISO/DIS 15686-5.
- Ménadier, J.-P., 2003. Le métier d'intégration système, 1^{ère} ed. Hermès - Lavoisier, Paris, France. p 543. ISBN : 2-7462-0596-3.
- Mendoza, G.A., Macoun, P., 2000. Application de l'analyse multicritère à l'évaluation des critères et indicateurs. Cirad, Montpellier, France. p 80. ISBN : 2-87614-387-9.

- Michalopoulos, G., Christodouloupoulou, L., Giakoumaki, G., Manolaraki, C., Malliaraki, S., Aggelaki, K., Zontanou, E., 2011. Life Cycle Assessment of Extra Virgin Olive Oil produced by three groups of farmers in south Greece (No. 1). Athens, Greece. p 15.
- Milà i Canals, L., 2003. Contributions to LCA methodology for agricultural systems: site-dependency and soil degradation impact assessment. Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelone, Espagne. p 131.
- Ministère de l'Économie et des Finances, 2012. BIC – Amortissements – Régime de l'amortissement dégressif – Régime de l'amortissement dégressif spécifique à certains biens. Bulletin Officiel des Finances Publiques-Impôts.
- Morales, F., 2013. Eco-design of chemical processes: an integrated approach coupling process modelling, Life Cycle Assessment and multi-objective optimization. Université de Toulouse, Toulouse, France. p 204.
- Morales-Mendoza, F., Azzaro-Pantel, C., Belaud, J.-P., Pibouleau, L., Domenech, S., 2012. An integrated approach combining process simulation and life cycle assessment for ecoefficient process design. *Comput. Aided Chem. Eng.* 30, 1608–1612.
- Morley, C., Bia-Figueiredo, M., Gillette, Y., 2011. *Processus métiers et S.I. : gouvernance, management, modélisation*, 3rd ed, InfoPro. Dunod, Paris, France. p 320. ISBN : 978-2-10-055705-9.
- Nanni, N., Fiselier, K., Grob, K., Di Pasquale, M., Fabrizi, L., Aureli, P., Coni, E., 2011. Contamination of vegetable oils marketed in Italy by phthalic acid esters. *Food Control* 22, 209–214.
- Nemecek, T., Heil, A., Huguenin, O., Meier, S., Erzinger, S., Blaser, S., Dunja, D., Zimmermann, A., 2004. Life cycle inventories of agricultural production systems (Final No. 15). Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Suisse. p 360.
- Neri, P., 2006. LCA applicato alla filiera dell'olio d'oliva - Studio Standard (Technique). Università degli studi di Bologna, Bologna, Italy.
- Nicoletti, G.M., Notarnicola, B., Tassielli, G., 2001. Comparative LCA of virgin olive oil vs. seed oils, in: SIK DOCUMENT. Presented at the LCA in foods International conference, LCA in foods, SIK, Hanover, Germany, pp. 152–156.
- Notarnicola, B., Tassielli, G., Nicoletti, G.M., 2004. Environmental and economic analysis of the organic and conventional extra-virgin olive oil. *New Medit* 3, 28–34.
- OiLCA, 2011. Mejora de la competitividad y reducción de la huella de carbono del sector del aceite de oliva mediante la optimización de la gestión de residuos e la implantación de una eco-etiqueta . OiLCA. <http://www.oilca.eu/> (dernier accès 10 novembre 2012).
- Olivieri, G., Falconi, F., Pergreffi, R., Neri, P., Romani, A., 2005. Life cycle assessment for environmental integrated system in the olive oil tuscan company, in: European Meeting of the International Society for Industrial Ecology Conference Proceedings. Presented at the European Meeting of the International Society for Industrial Ecology, Bologne, Italie.
- Olivieri, G., Neri, P., Bandini, F., Romani, A., 2007. Life cycle assessment of Tuscany olive oil production, in: Pathways to Our Common Future. Presented at the AGS Annual Meeting 2007, AGS Focus Centre at Chalmers, Barcelone, Espagne, pp. 117–119.

- Panetto, H., Boucher, X., Millet, P.-A., 2008. Ingénierie d'entreprise et de système d'information dirigée par les modèles: quels usages? GT Easy-DIM.
- Peças, P., Ribeiro, I., Folgado, R., Henriques, E., 2009. A Life Cycle Engineering model for technology selection: a case study on plastic injection moulds for low production volumes. *Journal of Cleaner Production* 17, 846–856.
- Perdreau, B., Thomas, P., 2012. L'écoconception, Afnor Editions. ed, 100 questions pour comprendre et agir. Afnor, Paris, France. p 220. ISBN : 978-2-12-465393-5.
- Perry, N., 2007. Industrialisation des connaissances : approches d'intégration pour une utilisation optimale en ingénierie (cas de l'évaluation économique). Habilitation à diriger les recherches, le 8 novembre 2007, Nantes, France. p 222.
- Pinatel, C., Olivier, D., Artaud, J., 2007. Fiche variétale: Aglandau.
- Plumecocq, G., 2013. Analyse multicritère à l'échelle territoriale. Séminaire de la plateforme MEANS le 5 septembre 2013, Rennes, France.
- Puyou, J.-B., 2012. Démarches d'écoconception en entreprise. Techniques de l'ingénieur Stratégies de conception pour l'innovation. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/strategies-de-conception-pour-l-innovation-42127210/demarches-d-ecoconception-en-entreprise-g6050/>
- Quintana, S., Busset, G., Sablayrolles, C., Montréjaud-Vignoles, M., Belaud, J.-P., s.d. Review on Social Life Cycle Assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* (soumis).
- Ramani, K., Ramanujan, D., Bernstein, W.Z., Zhao, F., Sutherland, J., Handwerker, C., Choi, J.-K., Kim, H., Thurston, D., 2010. Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. *J. Mech. Des.* 132. p 15.
- Recchia, L., Bonicelli, P., Cini, E., Vieri, M., Garbati Pegna, F., Sarri, D., 2011. Olive oil production chain, in: *Multicriteria Analysis and LCA Techniques With Applications to Agro-Engineering Problems*. Springer-Verlag Berlin, Berlin, Germany, pp 5-26. ISBN : 978-0-85729-703-7.
- Rist, G., 2001. L'invention du développement, in: *Le Développement, Histoire D'une Croyance Occidentale*. Presses de Sciences Po, Paris, pp. 116–129. ISBN : 2-7246-0864-X.
- Rodriguez-Acuna, R., Carmen Perez-Camino, M.D., Cert, A., Moreda, W., 2008. Sources of contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in Spanish virgin olive oils. *Food Addit. Contam.* 25, 115–122.
- Roig, A., Cayuela, M.L., Sánchez-Monedero, M.A., 2006. An overview on olive mill wastes and their valorisation methods. *Waste Management* 26, 960–969.
- Salomone, R., Cappelletti, G.M., Ioppolo, G., Mistretta, M., Nicoletti, G.M., Notarnicola, B., Olivieri, G., Pattara, C., Russo, C., Scimia, E., 2010. Italian experiences in life cycle assessment of olive oil: a survey and critical review, in: *Conference Proceedings of the 7th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector*. Bari, Italie, pp. 265–270.
- Salomone, R., Ioppolo, G., 2012. Environmental impacts of olive oil production: a Life Cycle Assessment case study in the province of Messina (Sicily). *J. Clean Prod.* 28, 88–100.

- Schiesser, P., 2011. Eco-conception - Indicateurs, méthodes, réglementation. Dunod ed. Conception, Paris, France. p 196. ISBN : 978-2-10-053378-7.
- Sofa, A., Nuzzo, V., Palese, A.M., Xiloyannis, C., Celano, G., Zukowskyj, P., Dichio, B., 2005. Net CO₂ storage in mediterranean olive and peach orchards. *Sci. Hortic.* 107, 17–24.
- Sugiyama, H., Hirao, M., Chen, B., Arthur, W.W., 2003. Development of process design methodology based on life cycle assessment, in: *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, pp. 624–629.
- Swarr, T., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.-L., Citroth, A., Brent, A.C., Pagan, R., 2011. *Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry. p 98. ISBN : 9781880611876.
- Taguieff, P.-A., 2001. *Du Progrès. Biographie D'Une Utopie Moderne*, Libro. ed J'ai Lu. Paris, France. p . ISBN : 9782290308646.
- Tavana, M., Pirdashti, M., Kennedy, D.T., Belaud, J.-P., Behzadian, M., 2012. A hybrid Delphi-SWOT paradigm for oil and gas pipeline strategic planning in Caspian Sea basin. *Energy Policy* 40, 345–360.
- Terzi, S., 2005. *Elements of products life cycle management: definitions, open issues and references models*. Nancy, Nancy, France. p 313.
- Traverso, M., Finkbeiner, M., Jorgensen, A., Schneider, L., 2012. Life Cycle Sustainability Dashboard. *J. Ind. Ecol.* 16, 680–688.
- Truong-Meyer, X.-M., 2012. *Modélisation en génie des procédés. Techniques de l'ingénieur Modélisation en génie des procédés* <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/modelisation-en-genie-des-procedes-42328210/modelisation-en-genie-des-procedes-j1021/>.
- Ulmer, J.-S., 2011. *Approche générique pour la modélisation et l'implémentation des processus*. Université de Toulouse, Toulouse. p 210.
- UNEP, (United Nations Environment Programme), 2009. *Guidelines for social life cycle assessment of products*. Catherine Benoît & Bernard Mazijn, Montréal & Ghent. p 104. ISBN : 978-92-807-3021-0.
- UNEP, (United Nations Environment Programme), 2011. *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products*. Catherine Benoît & Bernard Mazijn, Montréal & Ghent. p 86. ISBN : 978-92-807-3175-0.
- Veillet, S., 2010. *Enrichissement nutritionnel de l'huile d'olive : entre tradition et innovation*. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. Avignon, France. p 160.
- Vernadat, F., 1999. *Techniques de modélisation en entreprise: applications aux processus opérationnels*, Economica. ed, Gestion. Paris, France. p138. ISBN : 2-7178-3853-8.
- Vinyes, E., Oliver-Sola, J., Ugaya, C., Rieradevall, J., Gasol, C.M., 2013. Application of LCSA to used cooking oil waste management. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 445–455.
- Vivien, F.-D., Lepart, J., Marty, P., 2013. *L'évaluation de la durabilité*, Quae. ed, Indisciplines. Clermont-Ferrand, France. p 268. ISBN : 978-2-7592-1904-9.

- WB, (The World Bank), 2006. Environment - Multi-criteria Analysis (MCA). <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/ENVIRONMENT/0,,contentMDK:21605094~pagePK:148956~piPK:216618~theSitePK:244381~isCURL:Y,00.html> (dernier accès le 17 janvier 2014).
- Webb, J., Ellis, S., Harrison, R., Garwood, T.W., Chambers, B.J., 2000. Nitrogen in arable farming, in: Agricultural Data for Life Cycle Assessment. Agricultural Economics Research Institute, The Hague, The Netherlands, p. 155. ISBN : 90-5242-563-9.
- Weidema, B.P., 2006. The integration of economic and social aspects in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 11, 89–96.
- Weidema, B.P., Wesnaes, M.S., 1996. Data quality management for life cycle inventories: an example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production* 4, 167–174.
- Weidenhaupt, A., Meier, M., 2000. Analyse du cycle de vie Application aux systèmes de dépollution. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/systemes-de-management-environnemental-42442210/analyse-du-cycle-de-vie-g5810/>.
- Zaidat, A., 2005. Spécification d'un cadre d'ingénierie pour les réseaux d'organisations. Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France. p 258.
- Zamagni, A., Guinee, J., Heijungs, R., Masoni, P., Raggi, A., 2012. Lights and shadows in consequential LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 904–918.
- Zaraté, P., 2005. Des systèmes interactifs d'aide à la décision aux systèmes coopératifs d'aide à la décision: contributions conceptuelles et fonctionnelles. Habilitation à diriger les recherches. Toulouse, France. p 142.

Glossaire

A

Activité *Activity* : étape élémentaire d'un processus constituée d'un ensemble d'actions qui consomment du temps et des ressources. Une action structure un processus.

Affectation *Allocation* (ISO, 2006a) : imputation des flux entrant ou sortant d'un processus ou d'un système de produits entre le système de produits étudié et un ou plusieurs autres systèmes de produits.

Analyse de la durabilité du cycle de vie durable (AdCV) *Life cycle sustainability assessment (LCSA)* : méthode d'évaluation basée sur l'ACV qui consiste en l'évaluation de tous les impacts environnementaux, sociaux et économiques, négatifs ou bénéfiques liés aux processus de décisions. Elle vise en particulier les produits et services et peut combiner l'AeCV, AcCV et l'AsCV.

Analyse des coûts du Cycle de Vie (AcCV) (ou Analyse du Cycle des Coûts (ACC)) *Life Cycle Costing (LCC)* : méthode d'évaluation des éléments de coûts associés à toutes les étapes du cycle de vie d'un système. Elle peut inclure les coûts environnementaux et sociaux.

Analyse du cycle de vie (ACV) : *Life Cycle Assessment (LCA)* (Jolliet *et al.*, 2005) : méthode d'évaluation et de comparaison des impacts d'un système sur son environnement extérieur tout au long de son cycle de vie.

Analyse du cycle de vie attributionnelle *Attributional Life cycle assessment* : ACV qui décrit les flux (matière, énergie, monnaie, personne) qui transitent entre un système et l'environnement tout au long de son cycle de vie (équivalent à l'ACV « classique »).

Analyse du cycle de vie conséquentielle *Consequential Life cycle assessment* : ACV qui décrit la manière dont seront affectés les impacts entre le système et l'environnement extérieur en réponse à des décisions stratégiques.

Analyse sociale du cycle de vie (AsCV) *Social Life cycle assessment (sLCA)* : technique d'évaluation des impacts sociaux potentiels qui permet d'évaluer les aspects sociaux et socio-économiques des produits et leurs impacts positifs et négatifs tout au long de leur cycle de vie.

Architecture *Architecture* (AFIS, 2004) : organisation fondamentale d'un système représenté d'une part par ses constituants, leurs inter-relations, leurs relations avec l'environnement et d'autre part par les principes guidant sa conception et son évolution.

B

Besoin *Requirements* (Ménadier, 2003) : nécessité ou désir exprimé par un utilisateur (NFX.50.150), ou par toute partie intéressée par l'utilisation et l'exploitation du système.

Business Process Management (BPM) (Ingénierie des processus métier) (Ulmer, 2011) : approche qui permet de modéliser, déployer, exécuter et optimiser de manière continue les différents types de processus et ainsi d'améliorer l'agilité d'une organisation à l'aide des technologies de l'information.

C

Catégorie d'impact *Impact category* (ISO, 2006a) : critère qui caractérise un effet, une conséquence d'un flux classe représentant les points environnementaux étudiés à laquelle les résultats de l'inventaire du cycle de vie peuvent être affectés.

Conception et développement d'un système *Design and development of a system* (ISO, 2005) : ensemble de processus qui transforme des exigences en caractéristiques spécifiées ou en spécification d'un produit, d'un processus ou d'un système

Contrainte *Constraints* (Ménadier, 2003) : limitation pesant sur le système ou ses processus et réduisant la liberté du concepteur ; exigence strictement contraignante (par opposition à une attente).

Co-produit *By-product* (ISO, 2006a) : l'un quelconque de deux produits ou plus issus du même processus élémentaire ou système de produits.

Critère. *Criterion* : donnée de référence qui caractérise quelque chose.

Cycle de vie *Life cycle*: ensemble de phases successives de l'existence d'un objet, depuis l'idée jusqu'à la fin de vie. Le cycle de vie est une représentation temporelle du système.

D

Décision *Decision*: acte par lequel une solution est choisie

Développement durable *Sustainable development* (CEMD, 1987) : « un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ».

Donnée *Data* : description d'une réalité. Elle peut être quantitative, semi-quantitative ou qualitative.

Durabilité *Sustainability* : qualité de ce qui est s'étend dans le temps. Dans le contexte de cette thèse, la durabilité constitue l'objectif global à atteindre. Ainsi, elle ne qualifie pas uniquement le développement ni la croissance, mais aussi et surtout les sociétés et, plus généralement, la vie et sa diversité (au sens biologique du terme).

Durable *Sustainable* : Tout ce qui contribue favorablement à la durabilité des sociétés et de la vie.

E

Écoconception : démarche préventive et d'innovation qui se caractérise par la prise en compte de l'environnement lors de la phase de conception ou de re-conception d'un produit dans le but d'améliorer la qualité écologique du produit.

Éco-efficience *Eco-efficiency* : relation entre le bénéfice économique (en unités monétaires) et l'impact environnemental causé.

Efficacité *Efficiency* (ISO, 2005) : niveau de réalisation des activités planifiées et d'obtention des résultats escomptés

Efficience *Efficiency* (ISO, 2005) : rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées.

Entreprise *Enterprise* : système sociotechnique motivé par un ou plusieurs buts et objectifs.

Environnement *Environment* : tout ce qui est extérieur au système ; volet écologique de l'environnement

Étape *Stage* : voir « phase ».

F

Flux de référence *Reference flow* (ISO, 2006a) : mesure des extrants des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle

Flux élémentaire *Elementary flow* (ISO, 2006a) : matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l'environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure.

Fonction *Function* (AFIS, 2004) : tâche ou activité exécutée pour atteindre un résultat attendu.

G

Grignon (en espagnol : *orujo* ; en anglais : *pomace*) (COI, 2012c) : résidu solide de la production d'huile d'olive.

I

Impact *Impact* : effet de quelque chose sur l'état d'une autre chose.

Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) (*Model-Driven Engineering (MDE)*) (Ulmer, 2011) : approche intégrative générale mettant à disposition des outils, concepts et langages pour créer et transformer des modèles.

Indicateur *Indicator* : représentation quantifiable d'un critère

Information *Information* (ISO, 2005) : données significantes.

Infrastructure *Infrastructure* (ISO, 2005) : système des installations, équipements et services nécessaires pour le fonctionnement d'un organisme.

Ingénierie système *System Engineering* (Ménadier, 2003) : domaine de recherche et un domaine appliqué qui correspond soit à la phase de définition d'un système et des processus permettant de le produire, de l'exploiter, de le maintenir, soit à une approche de collaboration interdisciplinaire pour le développement progressif et la vérification de la définition d'une solution (système et son cycle de vie) harmonieuse satisfaisant l'ensemble des parties prenantes et acceptable pour l'environnement.

Intrant *Input* (ISO, 2006a) : flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire.

M

Management *Management* (ISO, 2005) : activités coordonnées pour orienter et contrôler un organisme.

Management par approche système *System approach to management* (ISO, 2005) : identifier, comprendre et gérer des processus corrélés comme un système contribue à l'efficacité et à l'efficience de l'organisme à atteindre ses objectifs.

Margine (en espagnol *Alpechin*) : résidu liquide de la production d'huile d'olive.

Métamodèle *Metamodel* (Jézéquel *et al.*, 2012): modèle qui définit le langage d'expression d'un modèle, c'est-à-dire le langage de modélisation.

Métier *Business* (Ulmer, 2011): ensemble d'activités d'un domaine donné nécessitant des compétences et savoir-faire des acteurs de l'entreprise.

Modèle *Model* (Meyer, 2009) : structure formalisée utilisée pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes et leurs relations. En IS : système plus ou moins homomorphe au système à étudier ou à construire, et permet d'en étudier certaines caractéristiques (Ménadier, 2003).

Moyen *Mean* : outil ou méthode.

O

Ontologie *Ontology* (Gruber, 1995) : spécification explicite d'une conceptualisation, cette dernière correspondant à une vision abstraite et simplifiée du monde.

Organisation *Organisation* (ISO, 2005) : ensemble de responsabilités, pouvoirs et relations entre les personnes ; entreprise au sens large.

P

Partie prenante *Stakeholder* (Ménadier, 2003) : Toute personne ou entité concernée de près ou de loin par le système, son utilisation, sa réalisation ou sa maintenance et donc susceptible d'exprimer des exigences (besoins et contraintes).

Phase *Phase* (ou étape ou stade) (AFIS, 2004) : période du cycle de vie qui correspondent à un état du système ou de sa description.

Point de vue *Point of view* (AFIS, 2004) : spécification des conventions utilisées pour construire et utiliser une vue. Un modèle ou cadre à partir duquel peuvent être développées des vues individuelles, en établissant pour chaque vue, les objectifs et les utilisateurs ainsi que les techniques pour sa création et son analyse.

Procédé *Chemical process* (CNRTL, 2013) : suite d'opérations mises en œuvre pour le traitement ou l'élaboration de produits industriels. En *BPM*, modèle ou définition d'un processus impliquant la fabrication de produits à partir de matières premières (Debauche et Mégard, 2004).

Procédure *Procedure* (Ménadier, 2003) : Manière spécifiée d'accomplir une activité ou un processus. En *BPM* modèle ou définition d'un processus impliquant des personnes et de l'immatériel (Debauche et Mégard, 2004).

Processus *Process* (ISO, 2005) : ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie.

Processus élémentaire *Elementary process* (ISO, 2006a) : plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie pour laquelle les données d'entrée et de sortie sont quantifiées

Produit *Product* (ISO, 2005; Ménadier, 2003) : résultat d'activité ou de processus.

Projet *Project* (ISO, 2005) : processus unique qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques, incluant les contraintes de délais, de coûts et de ressources.

R

Ressource *Resource* : élément de matière, d'énergie, humains ou d'information utilisé au cours des processus qui ont lieu dans les différents systèmes de l'entreprise.

S

Stade *Stage* : voir « phase ».

Système *System* (De Rosnay, 1977) un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but.

Système de produits (ISO, 2006a) : ensemble de processus élémentaires comportant des flux de produits et des flux élémentaires, remplissant une ou plusieurs fonctions définies, qui sert de modèle au cycle de vie d'un produit

T

Tâche *Task* (Ménadier, 2003) : Instance d'activité d'un processus, ajustée à un résultat à atteindre dans le contexte du projet, placée sous contraintes de ressources, coût et délais et affectée à une responsabilité du projet.

U

Unité fonctionnelle *Functional unit* (ISO, 2006a) : performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie.

V

Vue *View* (AFIS, 2004) : représentation d'un système complet prenant comme perspective un ensemble de préoccupations liées.

Liste des abréviations

<i>ABC</i>	<i>Activity Based Costing</i>
ACC (<i>LCC</i>)	Analyse du Cycle des Coûts (<i>Life Cycle Costing</i>)
AcCV	Analyse des coûts du Cycle de Vie
ACV (<i>LCA</i>)	Analyse de Cycle de Vie (<i>Life cycle assessment</i>)
ACVI (<i>LCIA</i>)	Évaluation des impacts du cycle de vie (<i>Life Cycle Impact Assessment</i>)
AdCV	Analyse de la durabilité du Cycle de Vie
AeCV	Analyse environnementale du Cycle de Vie
AFIS	Association Française d'Ingénierie Système
AFS (<i>MFA</i>)	Analyse des Flux de Substances (<i>Mass Flow Analysis</i>)
AMC (<i>MCA</i>)	Analyse multicritère (<i>Multicriteria analysis</i>)
<i>ARIS</i>	<i>Architecture for Integrated Information Systems</i>
AsCV (<i>sLCA</i>)	Analyse sociale du Cycle de Vie (<i>social Life Cycle Assessment</i>)
BACT	Bénéfice ACTualisé
BM (<i>WB</i>)	Banque Mondiale (<i>World Bank</i>)
CEE	Communauté Économique Européenne
CEMD (<i>WCED</i>)	Commission pour l'Environnement Mondial et le Développement (<i>World Commission on Environment and Development</i>)
CGE	Coût Global Étendu
<i>CIMOSA</i>	<i>Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture</i>
CNRTL	Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales
COI (<i>IOC</i>)	Conseil Oléicole International (<i>International Olive Council</i>)

CTO	Centre Technique de l’Olivier
DD (<i>SD</i>)	Développement durable (<i>Sustainable Development</i>)
DEP (<i>EPD</i>)	Déclaration Environnementale de Produit) (<i>Environmental Product Declaration</i>)
<i>ECETOC</i>	<i>European Center for Ecotoxicology and Toxicology Of Chemicals</i>
ÉD	Évaluation de la Durabilité
EEP (<i>PEF</i>)	Empreinte Environnementale Produit (<i>Product Environmental Footprint</i>)
ÉES	Évaluation Environnementale Stratégique
ÉIE	Évaluation des Impacts sur l’Environnement
ÉIS	Évaluation des Impacts Sociaux
ÉRIS (<i>HRA</i>)	Évaluation des Risques pour la Santé (<i>Health Risk Assessment</i>)
ÉRS	Évaluation des Répercussions sur la Santé
FEDER	Fonds Européen pour le Développement Économique des Régions
<i>GERAM</i>	<i>Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology</i>
<i>GIM</i>	<i>GRAI Integrated Methodology</i>
GRAI	Graphe à Résultats et Activités Inter-reliés
<i>GRI</i>	<i>Global Reporting Initiative</i>
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
ICV (<i>LCI</i>)	Inventaire du cycle de vie (<i>Life Cycle Inventory</i>)
IDM (<i>MDE</i>)	Ingénierie Dirigée par les Modèles (<i>Model Driven Engineering</i>)
IE (<i>EE</i>)	Ingénierie d’Entreprise (<i>Enterprise Engineering</i>)
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
IPM (<i>BPM</i>)	Ingénierie des Processus Métier (<i>Business Process Management</i>)

IS (SE)	Ingénierie Système (<i>System Engineering</i>)
ISBM (MBSE)	Ingénierie Système Basée sur les Modèles (<i>Model Based System Engineering</i>)
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
LCA	Laboratoire de Chimie Agro-industrielle département
LGC	Laboratoire de Génie Chimique
MEEDAT	Ministère de l'écologie, De l'environnement du développement durable et de l'aménagement du territoire
MME	Méthodes de Modélisation d'Entreprise
OCL	<i>Object Constraint Language</i>
OHSAS	<i>Occupational Health and Safety Assessment Standard</i>
OMG	<i>Object Management Group</i>
ONU (UN)	Organisation des Nations Unies (<i>United Nations</i>)
OWL	<i>Web Ontology Language</i>
P ² E	Procédé-Produit-Entreprise
PCV (LCT)	Pensée Cycle de Vie (<i>Life Cycle Thinking</i>)
PEHD	PolyÉthylène Haute Densité
PERA	<i>Purdue Enterprise Reference Architecture</i>
PET	PolyÉthylène Téraphtalates
PIB	Produit Intérieur Brut
PNUD (UNDP)	Programme des Nations Unies pour le Développement (<i>United Nation Development Program</i>)

PNUE (<i>UNEP</i>)	Programme des Nations Unies pour l'Environnement (<i>United Nation Environment Program</i>)
PP	PolyproPylène
<i>PSE</i>	<i>Process System engineering</i> (équivalent du génie des procédés)
PSI	Procédés et Systèmes Industriels
RCP (<i>PCR</i>)	Règles de Catégorie de Produit (<i>Product Category Rules</i>)
<i>REACH</i>	<i>Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals</i>
<i>SA</i>	<i>Social Accountability</i>
<i>SADT</i>	<i>Structured Analysis Design Technics</i>
<i>SETAC</i>	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
<i>SysML</i>	<i>Modeling Language dedicated to complex Systems</i>
TRI	Temps de Retour sur Investissement
UF (<i>FU</i>)	Unité Fonctionnelle (<i>Functional Unit</i>)
<i>UML</i>	<i>Unified Modeling Language</i>
<i>VBA</i>	<i>Visual Basic for Application</i>
<i>XML</i>	<i>Extensive Markup Language</i>

Annexes

Annexe 1. Qualité des huiles d'olives

Les limites établies pour chaque critère et chaque dénomination comportent les marges d'erreur de la méthode recommandée

	Huile d'olive vierge extra	Huile d'olive vierge	Huile d'olive vierge courante	Huile d'olive vierge lampante *	Huile d'olive raffinée	Huile d'olive	Huile de grignons d'olive brute	Huile de grignons d'olive raffinée	Huile de grignons d'olive
4.1 <u>Caractéristiques organoleptiques</u>									
- odeur et saveur					acceptable	bonne		acceptable	bonne
- odeur et saveur (sur une échelle continue)									
- médiane du défaut	Me = 0	0 < Me ≤ 3,5	3,5 < Me ≤ 6,0**	Me > 6,0					
- médiane du fruité	Me > 0	Me > 0							
- couleur					jaune clair	claire jaune à vert		claire jaune à brun	claire jaune à vert
- aspect à 20°C pendant 24 heures					limpide	limpide		limpide	limpide
4.2. <u>Acidité libre</u> % m/m exprimée en acide oléique	≤ 0,8	≤ 2,0	≤ 3,3	> 3,3	≤ 0,3	≤ 1,0	non limitée	≤ 0,3	≤ 1,0
4.3. <u>Indice de peroxyde</u> en milliequivalents d'oxygène des peroxydes par kg d'huile	≤ 20	≤ 20	≤ 20	non limité	≤ 5	≤ 15	non limité	≤ 5	≤ 15

* La simultanéité des critères 4.1., 4.2., 4.3. n'est pas obligatoire; un seul peut suffire.

** Ou lorsque la médiane du défaut est inférieure ou égale à 3,5 et la médiane du fruité est égale à 0.

	Huile d'olive vierge extra	Huile d'olive vierge	Huile d'olive vierge courante	Huile d'olive vierge lampante	Huile d'olive raffinée	Huile d'olive	Huile de grignons d'olive brute	Huile de grignons d'olive raffinée	Huile de grignons d'olive
4.4. <u>Absorbance dans l'ultraviolet</u> (K ⁻¹ cm ⁻¹)									
- à 270 nm (cyclohexane) / 268 nm (iso-octane)	≤ 0,22	≤ 0,25	≤ 0,30		≤ 1,10	≤ 0,90		≤ 2,00	≤ 1,70
- Δ K	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01		≤ 0,16	≤ 0,15		≤ 0,20	≤ 0,18
- à 232 nm*	≤ 2,50**	≤ 2,60**							
4.5. <u>Teneur en eau et en matières volatiles</u> % m/m	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,3	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 1,5	≤ 0,1	≤ 0,1
4.6. <u>Teneur en impuretés insolubles dans l'éther de pétrole</u> % m/m	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,05	≤ 0,05		≤ 0,05	≤ 0,05
4.7. <u>Point d'éclair</u>	-	-	-	-	-	-	≥ 120°C	-	-
4.8. <u>Traces métalliques</u> mg/kg									
fer	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0		≤ 3,0	≤ 3,0
cuivre	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1		≤ 0,1	≤ 0,1
4.9. <u>Esters méthyliques (FAME) et éthyliques (FAEE) des acides gras</u>	- Σ FAME + FAEE ≤ 75 mg/kg ou - Σ FAME + FAEE > 75 mg/kg et ≤ 150 mg/kg et FAEE/FAME ratio ≤ 1,5								
4.10. <u>Teneur en phénols</u>	Voir point 11.25								

* Cette détermination est uniquement d'application par les partenaires commerciaux et à caractère facultatif.

** Les partenaires commerciaux du pays de vente au détail peuvent exiger le respect de ces limites lors de la mise à disposition de l'huile au consommateur final.

Source : (COI, 2011)

Annexe 2. Produits phytosanitaires utilisables par les oléiculteurs professionnels

Substance active	Utilisation	Spécialités commerciales	Dose d'emploi	DAR	ZNT	DRE	Remarques
<i>Bacillus thuringiensis</i>	Teigne	Baciverz, Dipel DF, Delfin Bactospeine, Biobest BT, Scutello, Xentari	50 g/hl	3 j	5 m	48 h 6h	AB
Cuivre (sulfate, oxychlorure, hydroxyde, oxyde)	Œil de paon	Nombreuses spécialités	Différente selon les spécialités*	3 à 21 j *	Différentes selon les spécialités*		AB Limité à 6 kg de Cu métal / ha / an
deltaméthrine	Mouche	Decis Protech, Pearl Protech, Split Protech	0,083 l/hl	7 j	50 m	6 h	Limité à 3 applications / an
diméthoate	Mouche	Rogor PIPC 400 Danadim Progress	0,075 l/hl	28 j	5 m	48 h	Larvicide – traitement curatif Limité à 2 applications / an
flazasulfuron	Anti-germinatif	Katana, Flazavigne, Katamiss	200 g/ha	150 j	10 m		1 application / an au printemps sur culture installée
fluzafop-p-butyl	Défanant	Fusilade X2	1 à 3 l/ha *	21 j		48 h	Efficace sur graminées
glufosinate- ammonium	Défanant	Basta F1, Tresor, Glufo+, Basta Pro	5 l/ha	3 j	5 m		Efficace sur herbes annuelles – sur culture installée
glyphosate	Défanant	Nombreuses spécialités	Différente selon les spécialités et la cible*	3 j		24 à 48 h *	Limité à 3 applications / ha / an
fenoxycarbe	Cochenille	Insegar, Precision	40 g/hl	14 j	5 m	6 h	Larvicide
krésoxim-méthyl	Œil de paon	Stroby DF	20 g/hl	30 j	5 m	6 h	1 application conseillée / an en fin d'été
lambda-cyhalothrine	Mouche, Teigne, Pyrale, Otorrhynque	Karaté Zéon Karaté Xpress, Pool	Différente selon les spécialités et la cible*	7 j 7 j	20 m 5 m	48 h	Limité à 2 applications / an
mancozèbe	Œil de paon	Dithane Néotec	210 g/hl	21 j	5 m	48 h	Préventif- Limité à 2 applications / an
oxyfluorène	Anti-germinatif	Goal 2E	6 l/ha	90 j	20 m	24 h	Limité à 1 application / an
pyriproxyfène	Cochenille	Admiral Pro	0,030 l/hl		5 m	24 h	Larvicide Limité à 1 application / an
spinosad	Mouche	Syneis appât	1,2 l/ha	7 j	5 m	6 h	AB Traitement localisé préventif Limité à 4 applications / an
thiachloprid	Mouche	Calypso	0,025 l/hl	14 j			Larvicide – traitement curatif Limité à 2 applications / an
argile	Barrière	Areivert, Argibio, Argical Pro	30 à 60 kg/ha	3 j	-	-	AB

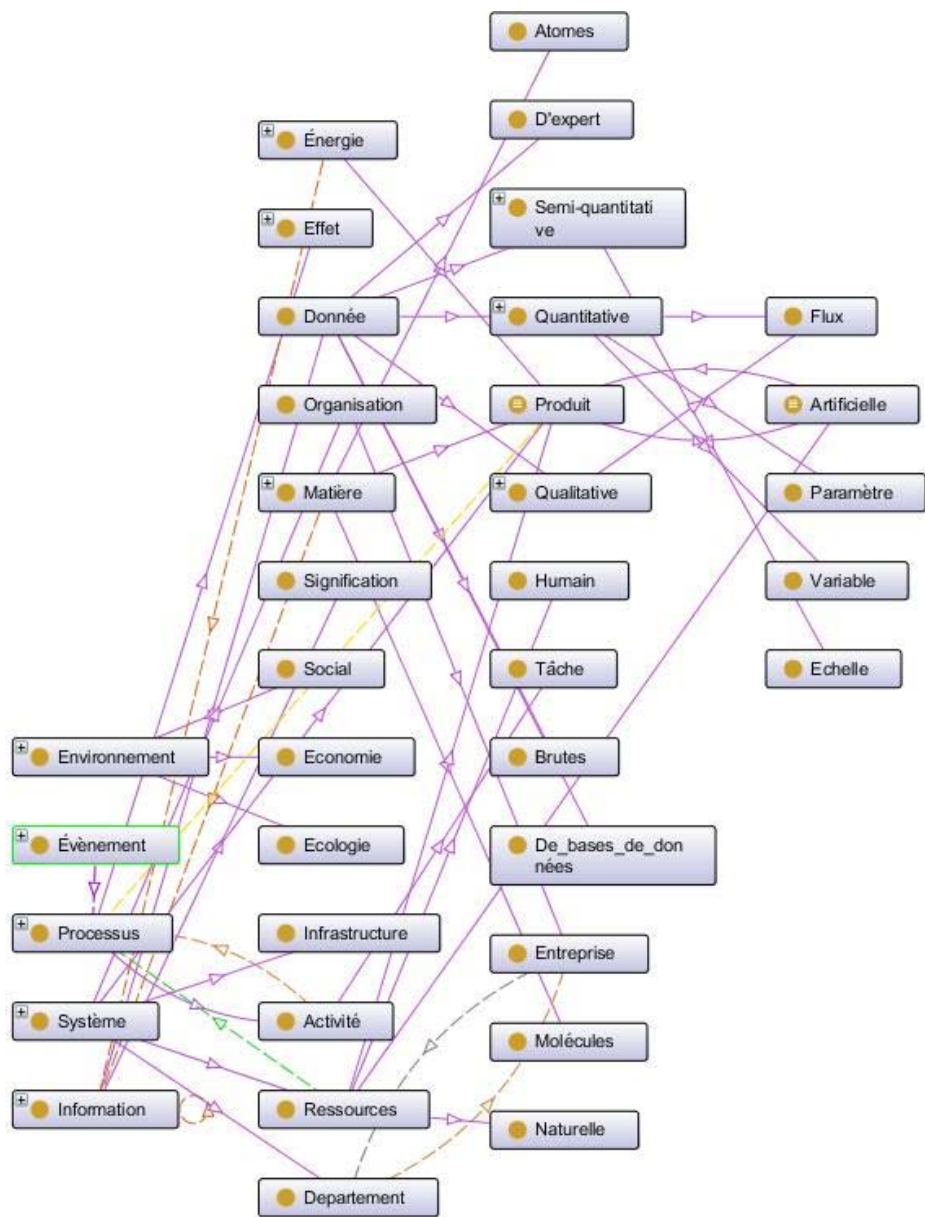
AB : autorisé en agriculture biologique

* se reporter aux préconisations du fabricant (étiquette) DAR : Délai avant récolte

ZNT : Zone Non Traitée DRE : Délai de rentrée

Source : (CTO, 2011)

Annexe 3. Représentation de l'ontologie de l'approche P²E



Annexe 4. Calcul des critères d'évaluation économique interne

Les investissements représentent toutes les dépenses encourues durant la création d'une unité de production. Ces dépenses concernent la conception de l'unité, l'achat des appareillages et de tout l'équipement nécessaire, la mise en place de ces matériels et équipements ou encore les essais et la réception de l'unité. Ces dépenses sont financées sur fonds propres et ne peuvent être récupérées en cas d'échec. Il convient de noter que les investissements correspondent à la valeur financière des infrastructures évaluées dans l'analyse de cycle de vie. Ils doivent *a priori* être considérés dans l'AcCV.

Une fois l'unité construite, il est nécessaire de mettre à disposition une certaine somme appelée fonds de roulement en raison du décalage entre les premières dépenses d'exploitation à assumer et les premières recettes à percevoir. Le fonds de roulement correspond donc à une avance récupérable sur les recettes futures. Il ne peut être placé et reste à disposition jusqu'à fermeture définitive de l'installation. Le montant de ces fonds est souvent fixé à 15 % des investissements.

Après avoir investi et reçu les fonds de roulement, l'exploitant peut percevoir des recettes et doit effectuer des dépenses. Afin de déterminer le bénéfice de l'exploitation de l'unité, l'amortissement des investissements doit être inclus dans le calcul du bénéfice.

Il consiste à prélever chaque année p une partie des recettes nettes telle que la somme de ces amortissements annuels A_p soit égale aux investissements initiaux au bout de l'année n . L'amortissement est soit linéaire, soit dégressif. L'amortissement linéaire correspond à l'investissement total divisé par le nombre d'années d'amortissement choisi. Ainsi, la somme à rembourser est constante d'année en année. L'amortissement dégressif suppose que l'unité de production perd chaque année un pourcentage fixe de la valeur qu'elle avait au début de l'année p correspondante. L'amortissement dégressif décroît d'année en année. Le taux d'amortissement dégressif est fixé par le Ministère des Finances en fonction de la durée d'exploitation et du coefficient d'amortissement dégressif (Tableau 28).

Tableau 28. Coefficients d'amortissement dégressif (Ministère de l'Économie et des Finances, 2012)

Durée d'exploitation n (années)	Coefficients d'amortissement dégressif
3-4	1,25
5-6	1,75
>6	2,25

La valeur du taux d'amortissement dégressif est donnée par l'Équation 12.

$$T_{ad} = 100 \times \frac{Coef_{ad}}{n}$$

Équation 12. Calcul du coefficient d'amortissement dégressif

Où $Coef_{ad}$ est le coefficient d'amortissement dégressif, T_{ad} le taux d'amortissement dégressif (en %) et n la durée d'exploitation. L'amortissement dégressif présente l'avantage d'amortir l'investissement plus rapidement qu'un amortissement linéaire. Cependant l'utilisation de l'amortissement dégressif ne permet pas de récupérer la totalité des investissements à la fin de la durée d'exploitation. Il faut donc à la fin de chaque année calculer l'amortissement autorisé par la règle dégressive et l'amortissement linéaire. Dès que l'amortissement dégressif devient inférieur au linéaire, l'amortissement linéaire est utilisé pour les dernières années de fonctionnement.

$$MBA_p = (V_p - D_p - A_p) \times (1 - a) + A_p$$

Équation 13. Calcul du bénéfice brut

Où MBA_p est le la marge brute d'autofinancement de l'année p (en €), a le taux d'imposition, V_p , D_p et A_p respectivement les recettes, les dépenses et l'amortissement de l'année d'exploitation p .

Dans le but de calculer le BACT, le TRI et l' i_r , il est nécessaire de définir le taux d'actualisation lequel permet d'accorder la même valeur entre un montant à un instant donné et le même montant n années plus tard. Le taux d'actualisation est régi par l'Équation 14.

$$M_0 = \frac{M_n}{(1+i)^n}$$

Équation 14. Calcul du taux d'actualisation

Où M_0 est le montant (€) à l'instant initial, M_n le montant n années plus tard et i le taux d'actualisation.

Finalement, le recours à un emprunt peut permettre d'améliorer la rentabilité d'un projet dans la mesure où le taux d'intérêt de l'emprunt est inférieur au taux d'actualisation de l'entreprise. Chaque emprunt est caractérisé par sa valeur, son taux d'intérêt et la durée de remboursement. Généralement, l'emprunt est remboursé par annuité défini par l'Équation 15.

$$A_e = \frac{E}{\sum_{p=1}^m \frac{1}{(1+i_e)^p}}$$

Équation 15. Calcul des annuités de remboursement de l'emprunt

Où A_e est l'annuité du remboursement de l'emprunt E sur une durée de m années avec un taux d'intérêt i_e . Contracter un emprunt entraîne également des dépenses annuelles supplémentaires dues aux frais financiers.

À partir des différentes données brutes ou calculées définies dans cette sous-section, les indicateurs de rentabilité sélectionnés pour la présente étude peuvent être calculés.

Le bénéfice actualisé (BACT) est le revenu supplémentaire que le projet est susceptible d'apporter en plus de la rémunération minimum du capital fixé arbitrairement au taux i . Le BACT est donné par l'Équation 16

$$BACT = -I - f + E + \sum_{p=1}^n \frac{MBA_p}{(1+i)^p} + \frac{f}{(1+i)^n} + \frac{I_r}{(1+i)^n}$$

Équation 16. Calcul du bénéfice actualisé

Où I correspond aux investissements (en €), f au fonds de roulement (en €), E à l'emprunt (en €), i au taux d'actualisation, n à la durée d'exploitation (en année), I_r à la valeur résiduelle des investissements (en €) et MBA_p à la marge brute d'autofinancement à l'année p (en €). La rentabilité d'un projet est déterminée par le signe du BACT. Si ce dernier est positif, le projet sera rentable, s'il est

négatif, le projet ne sera pas rentable. Le BACT repose sur deux hypothèses cruciales qui correspondent au choix de la valeur du taux d'actualisation et au nombre d'année d'exploitation. Or durant l'exploitation du projet, ces deux paramètres peuvent varier pour diverses raisons telles qu'une inflation. Le BACT ne suffit donc pas pour déterminer la rentabilité d'un projet. Pour pallier ce manque, le temps de retour sur investissement et le taux de rentabilité interne viennent compléter l'information fournie par le BACT.

Le temps de retour sur l'investissement (TRI) est la date k à laquelle la somme des MBA permet de récupérer l'investissement initial. Il correspond à la solution de l'Équation 17.

$$\sum_{p=1}^k \frac{MBA_p}{(1+i)^p} = I - E$$

Équation 17. Calcul du temps de retour sur investissement

Où I correspond aux investissements (en €), E à l'emprunt (en €), i au taux d'actualisation MBA_p à la marge brute d'autofinancement à l'année p (en €). Le TRI permet de s'affranchir de l'hypothèse sur la durée d'exploitation n . Plus le TRI est faible, moins élevés seront les risques sur la durée.

Le taux de rentabilité interne i_r correspond au taux d'actualisation qui permet d'annuler le BACT sur la durée de vie de l'exploitation. Il se calcule grâce à la résolution de l'Équation 18.

$$\sum_{p=1}^n \frac{MBA_p}{(1+i_r)^p} = 0$$

Équation 18. Calcul du taux de rentabilité interne

Où i_r est le taux de rentabilité interne MBA_p à la marge brute d'autofinancement à l'année p (en €) et n le nombre d'année d'exploitation. Le taux de rentabilité interne permet de s'affranchir de l'hypothèse sur le taux d'actualisation mais pas de celle sur la durée d'exploitation. Plus l' i_r est élevé, plus stable sera le projet vis-à-vis des fluctuations monétaires

Annexe 5. Questionnaire d'inventaire social



Questionnaire sur les implications sociales de l'entreprise de production d'huile d'olive pour la campagne 2010-2011

Nom Prénom
Nom et nature de l'organisme
Date

Vous nous avez déjà fourni des données environnementales et économiques de la campagne 2010-2011 dans le cadre du projet OiLCA dont l'objectif était d'évaluer la durabilité du secteur oléicole en France. Dans le cadre d'un travail universitaire de thèse dans le même domaine, nous vous contactons afin de vous inviter à répondre au questionnaire ci-dessous qui concerne les implications sociales de votre entreprise. Ces données resteront confidentielles et nous permettront de tester la validité de notre méthode d'évaluation.

1. Nombre de blessures et d'accidents fatals par an ?
2. Existe-t-il des mesures de sécurité générale (plusieurs réponses sont possibles) ?
 - Mesure de prévention des risques du travail
 - Protocole d'urgence en cas de blessures ou d'accident
 - Protocole d'urgence en cas d'exposition à des produits chimiques dangereux (pesticides)
 - Présence et utilisation d'équipement de protection dans les situations qui le nécessitent
 - Autres (préciser)
3. Comment estimez-vous la qualité et le nombre d'informations disponibles (sur le produit ou sur les moyens de communications connexes (publicités, site web, etc.)) concernant les propriétés nutritives et organoleptiques de du produit ? (« Suffisant » correspond à l'information strictement nécessaire vis-à-vis de la réglementation, « insuffisant » correspond à une information incomplète et « plus que suffisant » correspond à une information qui dépasse ce qu'exige la réglementation).
 - Insuffisant
 - Suffisant
 - Plus que suffisant
4. Nombre de plaintes ou de mécontentements concernant le produit vendu (reçus auprès du service consommateur ou directement auprès de votre organisme) ?

5. Participez-vous à la responsabilisation du consommateur en ce qui concerne la fin de vie des emballages (recyclabilité des emballages, etc.) par le biais d'information directement sur l'emballage ou sur les moyens de communication connexes?

Oui

Non

6. Quels sont les efforts réalisés par le secteur dans le développement des technologies ? (modernisation du procédé, achat de nouvelles machines, etc.)

7. Vous et/ou vos fournisseurs êtes-vous certifiés ISO9001 et/ou ISO 14001 ?

ISO9001

ISO 14001

Aucun des deux

Autres (préciser)

8. Recevez-vous une aide financière (oui ou non)?

Oui

Non

8.a Si oui, de quelle aide s'agit-il?

8.b Si oui, à combien s'élève-t-elle?

9. Quelle est votre contribution à l'économie locale (chiffre d'affaire annuel, coûts d'exploitation, Impôts, etc.)?

Chiffre d'affaire annuel :

Coûts d'exploitation :

Coût de personnel :

Bénéfice net :

Volume des ventes :

Impôts :

Investissement et temps de retour sur investissement :

10. Remplir le tableau suivant sur les travailleurs (si vous avez plus de 10 travailleurs, n'hésitez pas à rajouter des lignes, si vous avez moins de 10 travailleurs, ne remplissez que jusqu'au bon nombre de travailleurs)

Travailleur	Femme/ homme	Age	Contrat ¹	Durée du contrat	Poste occupé ²	Niveau d'étude ³	Salaire net (€/mois)	Salaire brut (€/mois)	Salaire brut chargé (€/mois)	Nombre moyen d'heures travaillées (par semaine)	Nombre de jours travaillés (par an)	Nationalité (si le travailleur est français, lieu de naissance)
N°1												
N°2												
N°3												
N°4												
N°5												
N°6												
N°7												
N°8												
N°9												

¹ Contrat : sans contrat, CDD, CDI, autres (préciser)

² Poste occupé : directeur, ouvrier, ingénieur, technicien, autres (préciser)

³ CAP, BEP, Bac, BTS, Licence, Master, Ingénieur, Doctorat, autres (préciser)

Annexe 6. Questionnaires d'inventaire environnemental et économique

Données générales de l'installation	Catégorie	Quantité	Unité (kg, kg/h, L, L/h, kWh, etc.)	Pourcentage dédié à l'activité de production de l'huile d'olive	Commentaires
	Superficie de l'installation				
	Ancienneté de l'installation				
	Temps d'opération / an				
	Production annuelle d'huile				
	Quantité d'olives traitées / an				
	Nombre de bouteilles en verre				
	Nombre de bouteilles en plastiques				
	Nombre de bouteilles Bib				
	Nombre de bouteilles en aluminium				
	Capacité régulière de traitement (kg d'olives / jour).				
	Coût énergétique en € / an				
	Eau consommée / an				
	Electricité consommée / an				
	Gaz naturel consommé / an				
	Fioul consommé / an				
Diesel consommé / an					
Produits d'entretien consommés / an					
Autres consommables consommés / an?					

Caractéristiques des produits et sous-produits obtenus	Catégorie	Paramètres	Quantité	Unité (kg, kg/h, L, L/h, kWh, etc.)	Commentaires	
	Huile d'olive vierge extra	Quantité générée / kg d'olives traitées				
		Acidité				
		Indice de peroxydes				
	Huile d'olive vierge	Quantité générée / kg d'olives traitées				
		Acidité				
		Indice de peroxydes				
	Margines	Quantité générée / kg d'olives traitées				
		Humidité relative				
		Matière grasse				
		Matière sèche				
	Grignons	Quantité générée / kg d'olives traitées				
Humidité relative						
Matière grasse						
Matière sèche						

Catégorie	Sous Catégorie	Nombre	Coût horaire	Nombre d'heure travaillées	Pourcentage dédié à la production d'huile	Coût annuel	Commentaires
Personnel	Direction						
	Administration						
	Commercial						
	Achats						
	Ingénieur						
Immobilisations	Technicien						
	Installation						
Fournitures	Eau						
	Téléphone						
	Internet						
	Electricité						
Services externes	Combustible						
	Sécurité						
	Courrier						
	Conseil						
	Cabinet-conseil						
Ventes et distribution	Ramassage des Déchets						
	Commissions						
	Présence à des foires						
	Réductions						
Coûts financiers	Chiffre d'affaire						
	Bénéfice net						

Etape de production	Processus inclus	Oui/Non	Technologie utilisée (type de machine (marque))		Nombre de machines	Type d'énergie utilisée (électricité, fioul, diesel, essence gaz, charbon...)	Nombre de moteurs	Puissance ou capacité	Unité (kW, m3/h, MJ, T/h, etc.)	Heures d'utilisation annuelle	Commentaires
Indéfinie	Production d'air comprimé		Ex: compresseur 11kw								
	Production d'eau chaude		Ex: chaudière 11kW								
	Production de froid (climatisation)		Ex: groupe froid 11kW								
Préparation des olives	Réception des olives		Ex: chariot élévateur	lève pallox							
	Lavage des olives		Ex: laveuse/effeuilleuse	tapis roulant							
	Pesée		Ex: balance pour camion	souffleuse							
	Stockage préalable des olives		Ex: caisses ou pallox	tapis roulant lavaeuse							
	Dénoyautage		Ex: séparateur	vis sans fin							
	Acheminement des olives		Ex: tapis roulant	broyeur							
	Broyage		Ex: broyeur à marteaux, broyeurs à disques, meule	malaxeur							
				ventilation malaxeur							
	Malaxage		Ex: malaxeurs	vis sans fin							
	Pressage		Ex: presse	vis sans fin							
Séparation grignon/huile	2 phases		Ex: centrifugeuse horizontale à deux moteurs	queue de cochon							
	2,5 phases		Ex: centrifugeuse horizontale à deux moteurs	décanteur (centrifugeuse horizontale)							
	3 phases		Ex: centrifugeuse horizontale à deux moteurs	racleur dans le décanteur							
Séparation huile/eau	Décantation statique		Ex: cuve inox de décantation	vibreux							
	Centrifugeuse		Ex: centrifugeuse verticale à moteur								
Stockage huile	Acheminement de l'huile dans les cuves de stockage		Ex: pompe 11 kW	centrifugeuse verticale							
	Stockage de l'huile obtenue		Ex: cuve inox	pompe d'évacuation							
Filtration	Filtration		Ex: tamis en sortie de cuve								
Stockage	Stockage margines		Ex: cuve								
Stockage	Stockage des grignons		Ex: cuve								
Nettoyage	Nettoyage des installations		Ex: karcher 11kW	karcher							
Elimination des	Elimination margines		Ex: épandeur	tracteur							
Elimination des grignons	Elimination des grignons		Ex: épandage/reprise apporteurs/compostage etc.								
Elimination des eaux usées	Eau laveuse		Ex: pompe 11 kW								
	Eau Nettoyage sols & murs		Ex: un tuyau qui distribue l'eau dans le milieu naturel								
	Eau nettoyage moulin		Ex: tuyau vers le réseau d'assainissement								
	Eau nettoyage cuves		Ex: tuyau vers le réseau d'assainissement								
Préparation des emballages	Réception des emballages										
Préparation de l'huile	Réception de l'huile		Ex: chariot élévateur								
	Stockage de l'huile		Ex: cuve inox								
	Filtration à plaques horizontales		Ex: filtre à plaques horizontales								
	Filtration à plaques verticales		Ex: filtre à plaques verticales								
	Filtration verticale à bougies		Ex: filtre vertical à bougies								
Remplissage	Remplissage volumétrique		Ex: remplisseur								
	Remplissage au poids		Ex: balance								
Stockage des cuves	Conservation air climatisé		Ex: chambre froide								

Processus inclus	Etape de production	Processus inclus	Oui/Non	Technologie utilisée (type de machine (marque))	Intrants matière (eau, huile de lubrification, gaz inerte, papier absorbant, chiffons, etc.)	Quantité annuelle	Unité (kg/h, m/h, L/h, etc.)	Déchets matière (eau, huile de lubrification, gaz inerte, papier absorbant, chiffons etc.)	Quantité annuelle	Unité (kg/h, m/h, L/h, etc.)	Commentaires	
Processus inclus	Indéfinie	Production d'air comprimé		Ex: compresseur 11kw								
		Production d'eau chaude		Ex: chaudière 11kW								
		Production de froid (climatisation)		Ex: groupe froid 11kW								
	Préparation des olives	Réception des olives			Ex: chariot élévateur							
		Lavage des olives			Ex: laveuse/effeuilleuse							
		Pesée			Ex: balance pour camion							
		Stockage préalable des olives			Ex: caisses ou pallox							
		Dénoyautage			Ex: séparateur							
		Acheminement des olives			Ex: tapis roulant							
		Broyage			Ex: broyeur à marteaux, broyeurs à disques, meule							
		Malaxage			Ex: malaxeurs							
	Séparation grignon/huile	Pressage			Ex: presse							
		2 phases			Ex: centrifugeuse horizontale à deux moteurs							
		2,5 phases			Ex: centrifugeuse horizontale à deux moteurs							
		3 phases			Ex: centrifugeuse horizontale à deux moteurs							
	Séparation huile/eau	Décantation statique			Ex: cuve inox de décantation							
		Centrifugeuse			Ex: centrifugeuse verticale à moteur							
	Stockage huile	Acheminement de l'huile dans les cuves de stockage			Ex: pompe 11 kW							
		Stockage de l'huile obtenue			Ex: cuve inox							
	Filtration	Filtration			Ex: tamis en sortie de cuve							
	Stockage margines	Stockage margines			Ex: cuve							
	Stockage grignons	Stockage des grignons			Ex: cuve							
	Nettoyage	Nettoyage des installations			Ex: karcher 11kW							
	Elimination des margines	Elimination margines			Ex: épandeur							
	Elimination des grignons	Elimination des grignons			Ex: épandage/reprise apporteurs/compostage etc.							
	Elimination des eaux usées	Eau lavuse			Ex: pompe 11 kW							
		Eau Nettoyage sols & murs			Ex: un tuyau qui distribue l'eau dans le milieu naturel							
Eau nettoyage moulin				Ex: tuyau vers le réseau d'assainissement								
Eau nettoyage cuves				Ex: tuyau vers le réseau d'assainissement								

Transports associés	Catégorie	Élément transporté	Quantité transportée/an	km parcourus	type de transport	Charge transportée par trajet	Origine/destination	Commentaires	
	Olive	Type d'olive: AOC/non							
		Type d'olive							
		Type d'olive							
		Type d'olive							
		Type d'olive							
	Matières premières et produits auxiliaires	Gaz techniques							
		Graisses							
		Huiles de lubrification							
		Combustibles							
		Filtres							
	Produits finals et intermédiaires	Grignons							
		Huile d'olive vierge extra							
	Résidus	Huile d'olive vierge							
		Feuilles et matériaux légers d'origine végétale							
		Terre et pierres							
		Branches							
		Noyaux							
		Filtres							
		Emballages vides							
Emballages	Chiffons sales								
	Capsules (plastiques)								
	Bouteilles en verres								
	Bagging box								
	Bouteilles en aluminium								
	Bidons en aluminium								
	Bouteilles en plastique								
Bidon en plastique autres?									
Matières premières et produits associés	Gaz techniques								
	Chiffons								
	Graisses								
	Huiles de lubrification								
	Combustibles								
Résidus	Filtres								
	Bouteilles vides								
	Chiffons sales								

Annexe 7. Données brutes vergers

Données générales	Unités	Vergers 1	Vergers 2	Vergers 3	Vergers 7	Vergers 10	Vergers 11	Vergers 4	Vergers 8	Vergers 5	Vergers 6	Vergers 9	Vergers 12	Pépinière	Moyenne	Corrélation géographique	Corrélation temporelle	Exhaustivité	Fiabilité	Taille de l'échantillon	Incertitude de base	Variance (avec un intervalle de confiance de 95%)	Incertitude relative en % de la valeur	
Superficie totale	ha	2,5	4,5	1,2	20,0	6,0	5,0	1,7	15,0	15,0	0,4	5,0	35,7	9,3	9,3	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Nombre d'arbres par ha	arbres/ha	100	200	285	250	285	287	285	200	380	330	220	1600		368,5	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Quantité d'olive par ha	t/ha/an	1,3	1,2	2,7	4,0	4,5	4,3	2,3	1,6	5,3	1,9	1,8	4,3		2,9	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Biologique ou non	oui/non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	oui			1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Irrigation (vergers)	Avec/ sans	avec	avec	avec	avec	avec	avec	sans	sans	avec	sans	sans	avec			1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Prix de vente de l'huile	€/L	12,00	12,00	11,00	7,90	4,38	7,64	11,00	21,00	7,90	7,90	16,00	16,00		11,2	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Niveau de mécanisation	1,2,3,4	1	2	2	3	4	4	2	2	3	3	3	4		2,7	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Type de production	Traditionnel/Intensif	trad	trad	trad	trad	trad	trad	trad	trad	int	int	trad	superintensif			1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Rapport huile produite sur olives traitées	L/kg	0,220	0,242	0,208	0,206	0,196	0,256	0,215	0,216	0,206	0,206	0,183	0,191		0,2	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Total ventes	€/an	8580	16165	7104	131320	44139	24375	9163	77250	128158	1237	26059	469245		78591,2									
Total dépenses	€/an	7632	9700	5600	57017	22903	17119	7966	35569	42763	1005	6805	76102		24181,7									
Total investissement	€	47103	61275	42927	170411	74174	99788	44097	130517	135411	30461	64576	502670		116950,8									
Nombre d'accident fatal par an	nombre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Mesure de prévention des risques du travail	oui/non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Protocole d'urgence en cas de blessures ou d'accident	oui/non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Protocole d'urgence en cas d'exposition à des produits chimiques dangereux (pesticides)	oui/non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	4,0		1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Présence et utilisation d'équipement de protection dans les situations qui le nécessitent	oui/non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Nombre d'emplois temps plein	nombre	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Niveau de formation	-																							
Taux de précarité	%															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Estimation de la qualité et nombre d'informations disponibles concernant les propriétés nutritives et organoleptiques du produit	Insuffisant/suffisant/plus que suffisant	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis	Suffis			1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Efforts réalisés par le secteur dans le développement des technologies	-															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Nombre de plaintes ou de mécontentements concernant le produit vendu	nombre															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Contribution à l'économie locale	€															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Pourcentage de travailleurs locaux	%															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Employés avec un haut niveau d'étude	%															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Employés avec un niveau d'étude de base	%															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	
Certifications	ISO ou autre															1	1	1	1	3	1,05	1,07	3,5%	

Annexe 8. Données brutes moulins

Données générales	Unités	Moulin 1	Moulin 7	Moulin 2	Moulin 4	Moulin 5	Moulin 6	Moulin 8	Moulin 9	Moulin 10	Moyenne	Exhaustivité			Fiabilité			Incertitude de base	Variance (avec un intervalle de confiance de 95%)	Incertitude relative en % de la valeur
Ancienneté de l'installation	année	10	4	9	1	11	5	1	5	2	5	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Système d'extraction	(presse, 2 phases, 3 phases)	p	3	2	2	2	2	2	2	2	Moy	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Superficie de l'installation	m2	550	1200	746	400	250	100	79	300	20	405	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Quantité d'olive traitées par an	kg/an	395000	925000	930480	59816	225000	90000	108879	130000	2000	318464	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Production annuelle d'huile	L/an	72000	167000	168558	10693	42000	12555	16520	28384	300	57557	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Rapport huile produite sur olives traitées	L/kg	0,182	0,181	0,181	0,179	0,187	0,139	0,152	0,218	0,150	0,174	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Marges produites par an	m3/an	550	1464	0	0	0	0	0	0	0	224	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Grignons produits par an	kg/an	158000	305000	746619	47853	200000	50000	76215	104000	1725	187712	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Quantité d'huile mise en bouteilles	L/an	6695	0	53510	7007	0	1300	5158	13738	244	9739	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Total ventes	€/an	315800	900000			300000		110000	3000	325760	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%	
Total dépenses	€/an	310400	173263		44342	250000	36000	137811	24808	2500	122391	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Total investissement	€		2200000	405479	400000		120000		180000	20000	554247	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Nombre d'accident fatal par an	nombre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Mesure de prévention des risques du travail	oui/non		Oui							Oui		1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Protocole d'urgence en cas de blessures ou d'accident	oui/non		Oui							Oui		1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Protocole d'urgence en cas d'exposition à des produits chimiques dangereux (pesticides)	oui/non		Non							Oui		1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Présence et utilisation d'équipement de protection dans les situations qui le nécessitent	oui/non		Oui							Oui		1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Nombre d'emplois temps plein	nombre											1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Niveau de formation												1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Taux de précarité	%											1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Estimation de la qualité et nombre d'informations disponibles concernant les propriétés nutritives et organoleptiques du produit	Insuffisant/suffisant/plus que suffisant		Suffisant							Suffisant		1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Efforts réalisés par le secteur dans le développement des technologies												1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Nombre de plaintes ou de mécontentements concernant le produit vendu	nombre		0,00E+00							0,00E+00	0,00E+00	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Contribution à l'économie locale	€											1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Pourcentage de travailleurs locaux	%									1,00E+02	100,0	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Total de travailleurs travaillant sur l'usine	Nombre																			
Employés avec un haut niveau d'étude	%									1,00E+02	100,0	1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Employés avec un niveau d'étude de base	%											1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%
Certifications	ISO ou autre		aucune							ISO 9001		1	2	1	1	1	3	1,05	1,07	3,7%

Annexe 9. Émissions dues à la combustion de carburants dans les engins agricoles

Flux	Unité	Émissions de la combustion de 1 L diesel ou de fioul	Émissions de la combustion de 1 L essence 2tps
Masse de carburant	kg/L fuel	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$
CO₂	kg/L fuel	$2,6 \cdot 10$	$2,4 \cdot 10$
NO_x	kg/L fuel	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
NM-VOC	kg/L fuel	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-1}$
CH₄	kg/L fuel	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
CO	kg/L fuel	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-1}$
NH₃	kg/L fuel	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$
N₂O	kg/L fuel	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
PM	kg/L fuel	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0
PM_{2,5}	kg/L fuel	$3,1 \cdot 10^{-3}$	0

Source : (European Environment Agency, 2006)

Annexe 10. Matrice de pédigrée & facteurs d'incertitude

Paramètre	Score de qualité				
	1	2	3	4	5
Fiabilité	Données vérifiées basées sur des mesures ou données qualitatives exactes (exemple: type de camion)	Données vérifiées partiellement basées sur des hypothèses ou données non vérifiées basées sur des mesures	Données vérifiées partiellement basées sur des hypothèses	Estimation qualifiée (ex : Données terrain).	Estimation non qualifiée
Exhaustivité	Données (qualitative ou quantitative) représentatives d'un échantillon suffisant d'entreprises du secteur	Données représentatives d'un petit nombre d'entreprises du secteur mais pour des périodes adéquates	Données représentatives pour un nombre adéquat d'entreprises du secteur mais pour des périodes plus courtes	Données représentatives pour un petit nombre d'entreprises du secteur et pour des courtes périodes ou données incomplètes pour un nombre adéquat de périodes et d'entreprises du secteur	Représentativité inconnue ou données incomplètes provenant d'un petit nombre d'entreprises du secteur et/ou pour des périodes plus courtes
Corrélation temporelle	Moins de 3 ans de différence avec l'année d'étude	Moins de 6 ans de différence	Moins de 10 ans de différence	Moins de 15 ans de différence	Age des données inconnu ou plus de 15 ans de différence
Corrélation géographique	Données de la zone à l'étude	Données moyennes d'une zone plus large dans laquelle la zone à l'étude est incluse	Données d'une zone ayant des conditions similaires		Données d'une zone inconnue ou zone avec des conditions de production très différentes
Corrélation technologique	Données d'entreprises, de processus et de matériaux à l'étude		Données de processus et matériaux à l'étude mais de différentes technologies	Données sur processus ou matériaux relatifs mais de technologies identiques	Données sur processus ou matériaux relatifs mais de technologies différentes
Taille de l'échantillon	> 100 mesures continues	> 20	>10	>= 3	inconnu

Score de qualité	Fiabilité	Exhaustivité	Corrélation temporelle	Corrélation géographique	Corrélation technologique	Taille de l'échantillon
1	1	1	1	1	1	1
2	1,05	1,02	1,03	1,01		1,02
3	1,1	1,05	1,1	1,02	1,2	1,05
4	1,2	1,1	1,2		1,5	1,1
5	1,5	1,2	1,5	1,1	2	1,2

Source : (Jolliet *et al.* 2010)

Annexe 11. Caractéristiques des catégories d'impacts environnementaux sélectionnées

Impact environnementaux intermédiaires	Description	Unité
Acidification	L'acidification correspond à l'effet environnemental de la diminution du pH. La méthode sélectionnée est <i>Accumulated Exceedance</i> dont l'unité est une quantité de proton libéré équivalente. Ce phénomène affecte les écosystèmes.	kg H+ eq
Déplétion de la couche d'ozone	La déplétion de la couche d'ozone correspond au phénomène de destruction de l'ozone stratosphérique par des atomes de chlore libérés par les chlorofluorocarbure (CFC). Ce phénomène diminue le rôle protecteur que joue la couche d'ozone contre les rayons ultraviolets émis par le soleil et qui affectent les espèces vivantes.	kg CFC-11 eq
Déplétion des ressources abiotiques (CML 2001)	La déplétion des ressources abiotiques correspond à l'effondrement du stock des ressources non biologiques. Elle est caractérisée par la rareté. Les impacts sur cette catégorie sont exprimés en quantité d'antimoine (sb) équivalent.	kg Sb eq
Déplétion des ressources aquatiques	La déplétion des ressources aquatique caractérise la pression locale sur la ressource en eau. Cette pression est exprimée en UBP (<i>Umwelt Belastung Punkten</i>) écopoint calculés à partir de la consommation d'eau et de la rareté de l'eau dans une zone géographique donnée.	UBP
Écotoxicité (UseTox)	L'écotoxicité exprime la toxicité d'une substance sur les écosystèmes. Elle exprimée en CTUe (<i>Comparative Toxic Unit for ecosystem</i>) qui intègre le nombre d'espèces affectées par unité de surface et par unité de temps.	CTUe
Eutrophisation d'eau douce (ReCiPe Mid H)	L'eutrophisation d'eau douce correspond à l'excès de matière nutritive qui favorise la prolifération d'algues qui peuvent asphyxier le milieu aquatique. Elle est exprimée en quantité équivalente de phosphore, principale substance responsable de ce phénomène.	kg P eq
Eutrophisation marine (ReCiPe Mid H)	L'eutrophisation marine correspond au même phénomène que l'eutrophisation d'eau douce mais pour le milieu marin. En revanche, elle est exprimée en quantité équivalente d'azote.	kg N eq
Eutrophisation terrestre	L'eutrophisation terrestre correspond à une prolifération de végétaux suite à un excès de matière nutritive dans la terre qui mène au déséquilibre écosystémique du milieu. Elle est exprimée en quantité équivalente d'azote.	kg N eq
Formation d'oxydants photochimiques (ReCiPe Mid H)	La formation d'oxydants photochimiques est provoquée par la réaction des espèces chimiques émises lors de la combustion des carburants avec les photons issus du soleil. L'augmentation de la concentration de ces espèces dans l'air affecte la photosynthèse et la respiration. Elle est exprimée en quantité de composés organiques volatiles hors méthane (<i>Non-Methane Volatile Organic Compounds (NMVOC)</i>) équivalente.	kg NMVOC
Occupation de terres agricoles	L'occupation des terres agricoles caractérise la variation annuelle de la surface agricole. Elle est exprimée en m ² par an.	m ² a
Occupation de terres urbaines	L'occupation des terres urbaines caractérise la variation annuelle de la surface construite. Elle est exprimée en m ² par an.	m ² a
Particules fines/ effets respiratoires inorganiques	Cette catégorie correspond à l'émission de particules fines qui affectent la santé humaine en provoquant des troubles respiratoires. Les impacts sur cette catégorie sont exprimés en quantité de particules fines de matières (<i>Particle Matter</i>) inhalés.	mg PM in
Radiations ionisantes sur la santé humaine	Les radiations ionisantes sur la santé humaine correspondent aux rayonnements électromagnétiques très énergétiques émis lors de la désintégration des matériaux radioactifs. Elles vont avoir un effet cancérigène et mutagène. Les impacts sur cette catégorie sont exprimés en nombre de désintégrations d'uranium 235 par seconde équivalentes. Une telle catégorie reçoit principalement des impacts liés à la production d'électricité d'origine nucléaire.	kBq U-235 eq
Radiations ionisantes sur les écosystèmes	Les radiations ionisantes sur les écosystèmes ont la même origine que celles sur la santé humaine. Cependant, elles sont exprimées en CTUe.	CTUe
Réchauffement Climatique (IPCC 100a)	Le réchauffement climatique correspond sur 100 ans correspond au phénomène de l'effet de serre qui consiste à renvoyer à la surface de la terre les rayonnements infrarouges qu'elle émet. Cet effet de serre mène à une augmentation de la température moyenne mesurée et conduit à modifier les équilibres thermodynamiques de l'atmosphère. Le climat mondial s'en trouve modifié. L'impact sur cette catégorie est exprimé en quantité de CO ₂ équivalente.	kg CO ₂ -eq.
Toxicité humaine, cancer (UseTox)	Cette catégorie correspond à l'augmentation de la mortalité par cancer due à l'émission d'une substance cancérigène. Elle est exprimée en CTUh (<i>Comparative Toxic Unit for human</i>).	CTUh
Toxicité humaine, hors cancer (UseTox)	Cette catégorie correspond à l'augmentation de la mortalité par intoxication due à l'émission d'une substance toxique. Elle est exprimée en CTUh (<i>Comparative Toxic Unit for human</i>).	CTUh
Transformation de terres naturelles	La transformation des terres agricoles caractérise la diminution de la surface naturelle au profit de la surface urbaine ou de la surface agricole. Elle est exprimée en m ² .	m ²

Annexe 14. Résultats d'AeCV et d'AcCV pour tous les scénarios étudiés

	Scénario	Moyen	PCIT	2CIT	3CIT	PCST	2CST	3CST
Score enviro	Points enviro	2,92E+02	1,97E+02	3,30E+02	1,86E+02	2,72E+02	4,05E+02	2,61E+02
Coût par UF	€/L	5,28E+00	4,83E+00	5,06E+00	4,73E+00	8,00E+00	8,23E+00	7,90E+00

	Scénario	PCII	2CII	3CII	PCSI	2CSI	3CSI
Score enviro	Points enviro	1,33E+02	2,67E+02	1,22E+02	2,81E+02	4,15E+02	2,70E+02
Coût par UF	€/L	2,48E+00	2,71E+00	2,37E+00	6,10E+00	6,34E+00	6,00E+00

	Scénario	PBST	2BST	3BST	PBIS	2BIS	3BIS
Score enviro	Points enviro	2,26E+02	3,60E+02	2,15E+02	1,70E+02	3,04E+02	1,59E+02
Coût par UF	€/L	5,09E+00	5,32E+00	4,98E+00	2,78E+00	3,01E+00	2,68E+00

Annexe 15. Résultats de l'analyse de sensibilité aux durées

		Unité	Jeux de paramètres					
			A	B	C	D	E	F
Paramètres	Durée de la pépinière	années	1	2	3	4	5	10
	Durée de vie du système de production	années	50	50	50	50	50	50
	Durée de vie des infrastructures	années	50	50	50	50	50	50
	Distance de du consommateur au lieu de vente	km	15	15	15	15	15	15
	Quantité d'huile transportée par le consommateur	L	4	4	4	4	4	4
Coût du cycle de vie par UF		€	5,28	5,33	5,38	5,44	5,49	5,74
Impact environnemental		Points environnemen taux	2,93E+02	3,08E+02	3,22E+02	3,37E+02	3,52E+02	4,25E+02

		Unité	Jeux de paramètres				
			G	H	I	J	K
Paramètres	Durée de la pépinière	années	1	1	1	1	1
	Durée de vie du système de production	années	20	30	40	75	100
	Durée de vie des infrastructures	années	50	50	50	50	50
	Distance de du consommateur au lieu de vente	km	15	15	15	15	15
	Quantité d'huile transportée par le consommateur	L	4	4	4	4	4
Coût du cycle de vie par UF		€	5,32	5,27	5,27	5,34	5,42
Impact environnemental		Points environnemen taux	2,86E+02	2,83E+02	2,87E+02	3,14E+02	3,37E+02

		Unité	Jeux de paramètres				
			L	M	N	O	P
Paramètres	Durée de la pépinière	années	1	1	1	1	1
	Durée de vie du système de production	années	50	50	50	50	50
	Durée de vie des infrastructures	années	20	30	40	75	100
	Distance de du consommateur au lieu de vente	km	15	15	15	15	15
	Quantité d'huile transportée par le consommateur	L	4	4	4	4	4
Coût du cycle de vie par UF		€	6,24	5,71	5,44	5,07	4,96
Impact environnemental		Points environnemen taux	3,93E+02	3,38E+02	3,10E+02	2,71E+02	2,60E+02

Annexe 16. Résultats de l'analyse de sensibilité aux rendements

Catégorie d'impact intermédiaire	Unité	Rendement du procédé					
		46,77%	54,57%	62,37%	70,55%	77,96%	85,75%
Respect du bilan matière	%	-4,29%	-3,26%	-2,22%	-1,13%	-0,15%	0,00%
Impact environnemental	Points environnementaux/L	3,82E+02	3,44E+02	3,16E+02	2,92E+02	2,75E+02	2,61E+02
Coût du cycle de vie	€/L	8,20E+00	6,97E+00	6,04E+00	5,28E+00	4,74E+00	4,26E+00

Annexe 17. Tableau de bord d'&cOlive

Critères de niveau 1 ou indicateurs	Unité	Verger	Moulin	Autres	Total
Rendement du procédé	%		70,55%		70,55%
Respect du bilan matière	%		-1,13%		-1,13%
Incertitude moyenne sur les données d'entrée	%	23,9%	21,6%		22,7%
Acidification	kg H+ eq	3,04E-02	3,07E-03	3,04E-04	3,37E-02
Déplétion de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	6,71E-07	3,62E-08	7,84E-09	7,15E-07
Déplétion des ressources abiotiques (CML 2001)	kg Sb eq	1,73E-02	2,20E-03	3,76E-04	1,99E-02
Déplétion des ressources aquatiques	UBP	2,03E+02	2,92E+00	1,16E-01	2,06E+02
Écotoxicité (UseTox)	CTUc	1,04E+01	1,53E-03	1,09E-04	1,04E+01
Eutrophisation d'eau douce (ReCiPe Mid H)	kg P eq	1,76E-03	1,09E-04	8,00E-06	1,88E-03
Eutrophisation marine (ReCiPe Mid H)	kg N eq	3,84E-04	3,64E-05	7,68E-05	4,97E-04
Eutrophisation terrestre	kg N eq	9,83E-02	7,14E-03	9,67E-04	1,06E-01
Formation d'oxydants photochimiques (ReCiPe Mid H)	kg NMVOC	2,38E-02	1,47E-03	2,56E-04	2,55E-02
Occupation de terres agricoles	m2a	3,11E-02	6,08E-02	2,48E-04	9,21E-02
Occupation de terres urbaines	m2a	2,06E-02	3,09E-03	2,00E-03	2,57E-02
Particules fines/ effets respiratoires inorganiques	mg PM in	2,39E-01	9,25E-03	3,43E-04	2,48E-01
Radiations ionisantes sur la santé humaine	kBq U-235 eq	4,25E-01	5,67E-01	1,15E-02	1,00E+00
Radiations ionisantes sur les écosystèmes	CTUc	1,74E-20	8,61E-21	7,59E-22	2,67E-20
Réchauffement Climatique (IPCC 100a)	kg CO2-Eq.	2,65E+00	2,64E-01	6,86E-02	2,98E+00
Toxicité humaine, cancer (UseTox)	CTUh	6,29E-10	2,44E-11	1,18E-11	6,66E-10
Toxicité humaine, hors cancer (UseTox)	CTUh	5,83E-09	9,31E-11	7,66E-12	5,93E-09
Transformation de terres naturelles	m2	8,43E-04	6,85E-05	1,77E-05	9,30E-04
Santé Sécurité au travail	Sans unité	1,00E+00	1,00E+00		
Santé du consommateur	Sans unité	1,00E+00	1,00E+00		
Développement de la technologie	Sans unité	0,00E+00	0,00E+00		
Emploi local	Sans unité	2,50E-01	8,25E+00		
Promotion de la responsabilité sociale	Sans unité	1,00E+00	1,00E+00		
BACT	€	2,03E+05	5,45E+05		
TRJ	année	2,13E+00	4,54E+00		
IR	Sans unité	3,28E-01	1,21E-01		2,93E+02
Coût par UF	€	4,88E+00	4,02E-01	2,77E-04	5,28E+00

Critères de niveau 2	Unité	Verger	Moulin	Autres	Total
Efficacité du procédé	sans unité		procédé à améliorer		
Pertinence de l'étude	sans unité	résultats pertinents	résultats pertinents		résultats pertinents
Santé humaine	DALY	2,39E-01	9,25E-03	3,44E-04	2,48E-01
Qualité des écosystèmes	Espèce.a n	6,14E-02	6,39E-02	5,52E-04	1,26E-01
Ressources naturelles	kgSbeq	1,73E-02	2,20E-03	3,76E-04	1,95E-02
Travailleurs	%	20%	20%	0%	20%
Consommateurs	%	50%	50%	0%	50%
Société	%	0%	0%	0%	0%
Communauté locale	%	2%	63%	0%	33%
Chaîne de valeur	%	100%	100%	0%	100%
Viabilité économique	sans unité	viable	non viable		en partie viable

Critères finals (niveau 2 ou 3)	Verger	Moulin	Autres	Total
Efficacité du procédé		procédé à améliorer		
Pertinence de l'étude	résultats pertinents	résultats pertinents		résultats pertinents
Impact environnemental	1,45E+02	1,47E+02	1,27E+00	2,93E+02
Impact social	1,72	2,33		2,03
Viabilité économique	viable	non viable		en partie viable

Annexe 18. Livrables du projet OiLCA

Le projet OiLCA a abouti à un grand nombre de résultats sur le système de production de l'huile d'olive qui ont été capitalisés à travers plusieurs livrables, à savoir un rapport d'analyse de cycle de vie avec révision critique, une étiquette environnementale et deux outils de calculs : OiLCA-Tool et &cOlive. Ce chapitre présente ces quatre livrables.

✓ Rapport d'ACV expertisé

Le rapport d'ACV rédigé en espagnol a reçu une revue critique par des experts catalans du groupe de recherche en ACV de l'Université Autonome de Barcelone dirigé par Rita Puig. Il décrit l'ensemble de l'analyse de cycle de vie de la production d'huile d'olive dans l'espace SUDOE, c'est-à-dire en Espagne, en France et au Portugal. Il présente la démarche et les résultats de l'évaluation de l'empreinte carbone et des coûts de la production d'un litre de trois types d'huile d'olive : l'huile d'olive vierge (ou vierge extra) l'huile d'olive (raffinée) et l'huile de grignons d'olive. Ce rapport complet permet de valider la démarche et les résultats moyens et sert de base pour le développement des deux outils de calculs.

✓ OiLCATool

OiLCATool permet de calculer l'empreinte carbone et les coûts de la production d'huile d'olive dans l'espace SUDOE. Il offre la possibilité d'évaluer les trois types d'huile susmentionnés. Disponible gratuitement sur le site internet du projet OiLCA (www.oilca.eu/oilcatool), il s'adresse aux professionnels du secteur oléicole de l'espace SUDOE et est accompagné d'un manuel d'utilisation traduit dans les trois langues. La figure 60 présente la page d'accueil d'OiLCATool.



Figure 60. Page d'accueil de l'outil OiLCATool

Après avoir saisi toutes les informations qui lui sont propres, l'utilisateur pourra télécharger un rapport automatique qui rassemble tous les résultats concernant sa situation. OiLCATool présente l'avantage d'être en accord avec les règles de catégories de produits (section 2.3.7), notamment en ce qui concerne la mise de côté des infrastructures. OiLCATool prétend également être un outil simple d'utilisation par des non-experts en analyse de cycle de vie. En revanche, l'inconvénient majeur de cet outil est son aspect monocritère qui ne permet pas d'avoir une vision globale sur les impacts environnementaux du système de production d'huile d'olive. Il ne permet pas non plus d'évaluer la durabilité. Enfin, sa structure et les hypothèses sur lesquelles il repose ne sont pas modifiables.

✓ Éco-étiquette OiLCA

Le projet OiLCA ayant pour but d'améliorer la compétitivité des entreprises du secteur oléicole, une étiquette environnementale de type II (auto déclaration environnementale) a été élaborée afin que les professionnels du secteur qui utilisent l'outil OiLCATool puissent communiquer sur leurs efforts (Figure 61).



Figure 61. Étiquette de type II proposée aux professionnels du secteur

Cette étiquette environnementale est générée automatiquement avec le rapport des résultats de l'application de l'outil.

Annexe 19. Liste complète des actions de dissémination

Articles publiés dans des journaux scientifiques avec comité de relecture

- G. Busset, J.P. Belaud, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *An Integrated Approach for Designing an Agricultural Process Guided by Sustainable Evaluation: Application to Olive-Oil Production*. INSIGHT 16, n° 2 (2013): 32-34.
- G. Busset, M. Sangely, M. Montrejaud-Vignoles, L. Thannberger, et C. Sablayrolles. *Life Cycle Assessment of Polychlorinated Biphenyl Contaminated Soil Remediation Processes*. International Journal of Life Cycle Assessment 17, n° 3 (2012): 325–336.
- G. Busset, C. Vialle, M. Montrejaud-Vignoles, M.C. Huau, S. Jacobs, et C. Sablayrolles. *Health Risk Assessment Case Study of Trace Metals in Collected Rainwater for Domestic Uses*. Fresenius Environmental Bulletin 20, n° 9 (2011): 2277 2283.

Article soumis dans des journaux scientifiques avec comité de relecture

- G. Busset, J.P. Belaud, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Life cycle assessment of olive oil: a literature review*. International Journal of Life Cycle Assessment
- L. Meneghel Fonseca, N. Chaouki, A. Benoist, G. Busset, R. Pirot, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Life Cycle Assessment of electricity generation from Jatropha oil in a short chain in Mali*. Energy for Sustainable Development

Conférences orales dans des congrès internationaux avec comité de relecture (présentateur souligné)

- G. Busset, J.P. Belaud, F. Clarens, J.J. Espi, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Life Cycle Assessment of Olive Oil Production in France*. In Proceedings of the 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, 4:987–992. Porto, Portugal, A. Nizhou & F. Castro, 2012.
- C. Vialle, G. Busset, M. Montréjaud-Vignoles, M.C. Huau, et C. Sablayrolles. *Environmental Assessment of Rainwater Harvesting (France)*. In Proceedings of the 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, 4:586-591. Porto, Portugal: A. Nizhou & F. Castro, 2012.

Conférences orales dans des événements nationaux (présentateur souligné)

G. Busset, J.P. Belaud, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Life cycle analysis : Reminder and application to olive oil production*. In Ecotech SUDOE : symposium on ecoinnovation in the SUDOE region, Toulouse, France, 2013.

G. Busset, J.P. Belaud, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Analyse de cycle de vie et écoconception: Fondamentaux et application à la production d'huile d'olive*, In Ecotech SUDOE: Regional day: Eco innovations en région Midi Pyrénées, Toulouse, France, 2013

G. Busset, M. Montréjaud-Vignoles, C. Sablayrolles and J.P. Belaud. *OiLCA – Application de l'analyse de cycle de vie à la réduction de l'empreinte carbone du secteur de l'huile d'olive*, In Ecotech SUDOE Séminaire ACV & Eco-Conception, Toulouse, France, 2013

G. Busset, C. Sablayrolles, M. Montréjaud-Vignoles, C. Capiscol, C. Fernandez-Cuevas, C. De Toro Navero, R. Trillo, M. Rovira, F. Clarens, J. Espi, J. Garza, J. Carvalho, J. Araujo, L. Chacon, L, and F. Delgado. *L'étiquetage environnemental, l'empreinte carbone et la production d'huile d'olive*, In Techno'huile : « Qualité des huiles d'olive : nouveaux indicateurs chimiques et contaminants », Montpellier, France, 2012

G. Busset, J.P. Belaud, C. Sablayrolles, M. Montréjaud-Vignoles and J,M, Lelann. *Approche intégrée dirigée par les modèles pour l'éco-conception des procédés agro-industriels: étude de la production d'huile d'olive*. In Journée nationale GDR MACS/STP, Albi, France, 2012

Posters dans des congrès internationaux avec comité de relecture

G. Busset, J.P. Belaud, F. Clarens, J.J. Espi, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Environmental evaluation of french olive oil production*. In the 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, Saint-Malo, France, 2012.

G. Busset, J.P. Belaud, F. Clarens, J.J. Espi, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Life cycle assessment of treatment processes of solid waste from the olive oil sector*. In the 8th International Conference on Renewable Resources & Biorefineries, Toulouse, France, 2012.

G. Busset, C. Sablayrolles, M. Montréjaud-Vignoles, C. Capiscol, C. Fernandez-Cuevas, C. De Toro Navero, R. Trillo, M. Rovira, F. Clarens, J. Espi, J. Garza, J. Carvalho, J. Araujo, L. Chacon, L, and F. Delgado. *OiLCA project: enhancing competitiveness and reducing carbon footprint of olive oil processes through waste management optimisation using life cycle assessment*. In ECOTECH'S & TOOLS, Montpellier, France, 2011

G. Busset, C. Sablayrolles, M. Montréjaud-Vignoles, C. Capiscol, C. Fernandez-Cuevas, C. De Toro Navero, R. Trillo, M. Rovira, F. Clarens, J. Espi, J. Garza, J. Carvalho, J. Araujo, L. Chacon, L. and F. Delgado. *OiLCA project: enhancing competitiveness and reducing carbon footprint of the processes of olive oil production through waste management optimisation using life cycle assessment*. In 1st International Conference WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, Guimarães, Portugal, 2011

Posters dans des évènements nationaux

G. Busset, J.P. Belaud, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Eco-conception des agro-procédés: application à la production d'huile d'olive*, XIV^{ème} congrès de la Société Française de Génie des Procédés, Lyon, France, 2013

G. Busset, J.P. Belaud, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles. *Approche intégrée dirigée par les modèles pour l'écoconception des procédés agro-industriels: étude de la production d'huile d'olive*, Forum Académie-Industrie AFIS 2012, Palaiseau, France, 2012

G. Busset, J.P. Belaud, M. Montréjaud-Vignoles and C. Sablayrolles *Influence de la durée de vie d'un système agro-industriel sur les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie*. Symposium ECOTECH'S 2012 : Evaluation environnementale et ACV: quels usages pour les acteurs publics et privés? Montoldre, France, 2012.