



HAL
open science

Permaingénierie : un cadre théorique de transition vers un paradigme de soutenabilité forte. Étude par les IHM

Lou Grimal

► To cite this version:

Lou Grimal. Permaingénierie : un cadre théorique de transition vers un paradigme de soutenabilité forte. Étude par les IHM. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de technologie de Troyes, 2023. Français. NNT: . tel-04309696

HAL Id: tel-04309696

<https://hal.science/tel-04309696>

Submitted on 27 Nov 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.



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de Développement Régional

THÈSE
pour l'obtention du grade de
DOCTEURE
DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE TROYES
EN SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

Spécialité : Systèmes socio-techniques

Présentée et soutenue par

Lou GRIMAL

**Permaingénierie : un cadre théorique de
transition vers un paradigme de soutenabilité
forte. Étude par les IHM**

Jury

Mme.	Claudia ECKERT	PROFESSOR	Rapporteure
Mme.	Catherine LETONDAL	MAITRESSE DE CONFÉRENCES	Rapporteure
M.	Nicolas PERRY	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS	Examinateur
Mme	Sophie QUINTON	CHARGÉE DE RECHERCHE	Examinatrice
M.	Damien TRENTESAUX	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS	Examinateur
Mme.	Inès DI LORETO	PROFESSEURE ASSOCIÉE	Directrice de thèse
Mme.	Nadège TROUSSIER	PROFESSEURE DES UNIVERSITÉS	Directrice de thèse

Personnalité invitée

Mme. Nicole SAENGER PROFESSOR

Remerciements

C'est à la fin de l'écriture de ce manuscrit, que je peux enfin me lancer dans les traditionnels remerciements. Paradoxalement, cette partie a été la plus difficile à rédiger car elle marque également la fin du doctorat - et c'est toujours difficile pour moi de finir un chapitre. Trois ans et quelques mois après avoir commencé ma thèse, je réalise le nombre de rencontres qui m'ont alimentée, touchée, parfois même déroutée... et qui m'ont finalement permis de trouver ma place de chercheuse. J'espère que le lecteur pourra deviner à travers cette thèse le plaisir que j'ai eu à l'écrire et de manière générale, à réaliser mes premiers travaux de recherche.

Je souhaite chaleureusement remercier Nadège Troussier et Inès di Loreto, pour leur accompagnement pendant ces 3 (presque 4) années. Merci d'avoir tout de suite sauté avec moi dans l'inconnu avec cette thèse interdisciplinaire. Vous m'avez soutenue, guidée, poussée à aller plus loin dans les questions scientifiques. J'ai pris beaucoup de plaisir à passer des moments avec vous, notamment lors de nos réunions de thèse, lors des conférences, lors des échanges informels. Merci pour tout ce travail d'accompagnement qui m'a permis de m'épanouir, de réaliser de nombreux projets connexes à ma thèse, et finalement de prendre du plaisir dans mes activités académiques.

Je souhaite remercier mon jury de thèse pour les échanges lors de ma soutenance. Merci à Catherine Letondal et Claudia Eckert pour leur travail de rapporteure. Merci à Sophie Quinton, Damien Trenteseaux, Nicole Saenger et Maud Rio pour leurs questions et l'attention qu'ils ont porté à mes travaux. Un très grand merci à Nicolas Perry pour avoir présidé ce jury interdisciplinaire, d'une main de maître. Durant les 3 heures 30 de soutenance, je n'ai pas le souvenir d'avoir souffert et j'ai beaucoup apprécié échanger avec vous.

Un grand merci également à Nicolas Burger qui m'a soutenu au quotidien dans ce marathon doctoral, qui a souvent critiqué mes idées, et que (parfois) je devrais plus écouter quand il me parle de ses découvertes (je vais essayer mais ce n'est pas dit que j'y arrive)! Je ne doute pas que l'on continuera à construire des projets, et j'espère que nous réussirons à mettre en oeuvre des démarches de recherche-action autour de l'initiative Portraits 2 Passages. Un merci tout particulier à Claudine Gillot, avec qui j'ai eu la chance de partager mon bureau de thèse. Merci à toi Claudine pour tous ces travaux en commun, que ce soit au conseil scientifique, que les ateliers sur l'interdisciplinarité, l'adoption de Jean-Paul(ette), la co-construction de cours ou bien encore l'inscription aux cours de yoga qui m'ont fait un bien fou. Certains de ces projets auxquels nous avons

participés étaient portés par Tatiana Reyes. Merci à toi Tatiana d'avoir ouvert des espaces de collaboration où j'ai pu expérimenter différentes pratiques pédagogiques ou encore participer à des projets d'envergure autour de la publication scientifique. Merci également d'avoir toujours répondu présente lorsque je te sollicitais pour écouter mes présentations, m'aider concernant la recherche bibliographique ou identifier les conférences à ne pas manquer !

Merci à Florian Bratec et Guillaume Jouanne de m'avoir incitée à contacter Inès et Nadège et à me lancer dans cette thèse. Merci à Maud Rio, Sophie Quinton et Pascal Salambier pour le temps passé à questionner mon travail, m'aider à aller plus loin, et à me structurer, notamment lors des comités de suivi de thèse. Vous avez su me faire réagir, surtout lors de la 3e année où je peinais à avancer.

Je souhaite remercier chaleureusement l'ensemble des habitants de l'Oasis du Coq à l'Âme, en particulier Alexandre Zénon et Sylvie Zénon pour leur accueil et la confiance qu'ils m'ont accordé tout au long de mon expérimentation au sein du collectif. Merci également aux étudiants du master IMEDD 2021 d'avoir accepté de participer à l'une de mes expérimentations et d'avoir été une source d'inspiration pour penser la permaingénierie.

Une thèse, c'est un travail méticuleux de lectures et d'analyses... Mais c'est aussi un travail basé sur des échanges, des bons moments et des collaborations avec des collègues !

Merci à toute l'équipe EUt+, en particulier Timothée Toury et Laetitia Roggero pour m'avoir intégrée à la dynamique et permis de rencontrer les partenaires européens dès janvier 2020. Merci également à Thomas Chazal pour m'avoir permis de mener des actions au sein de notre alliance ! Bon courage à lui et à Sebastian Pinto au sein du Student Board.

La possibilité de partir en conférence m'a permis de m'épanouir, de faire ce qui me plaisait avec des collègues : Paul Robineau autour des cours en EV14, Santiago Perez sur l'éthique écologique, Pauline Picot avec le voyage en train jusqu'à Stockholm. Également un merci à Adrien Fallot, Emmanuel Caillaud, Alexis Lalevée, Lou-Lyne pour les travaux collectifs sur le bien-être des chercheurs en soutenabilité. Merci à Miguel Lopez d'avoir partagé son bureau sur les dernières semaines de ma thèse et merci à lui de m'avoir fait connaître la recherche à l'UTT lorsqu'il est arrivé à Troyes. Une mention spéciale à Sophie Lévêque pour son aide et sa joie de vivre au sein du laboratoire !

Cette thèse n'aurait pas été un moment si intense sans SICT qui a rythmé mes deux dernières années de thèse. Merci aux membres de l'équipe organisatrice de SICT2022 et SICT2023. C'était tout simplement les moments les plus forts collectivement que j'ai vécu avec un travail de préparation des événements de longue haleine et des résultats d'une grande qualité. Merci à Thibault Pirson, Aina Rasoldier, Maxime Besacier, Blandine Ageron, Jan Tobias Mühlberg, Lennart Oldenburg, Noémie Bidoul, Louis Golard, Sara Bomark, Wiebe van Ranst, Iman Hussain, Fieke Jansen, David Ekchajzer.

Merci à toutes les personnes qui m'ont aidé à finaliser ce manuscrit en le lisant et en le relisant, une fois, dix, trente fois,... Plus ? Merci donc à Jean Bichet, Léna et à mes parents, Cathy et Jean-Yves, pour vos relectures ! Merci à Guillaume Pépin pour ton aide dans la vérification de mes statistiques. Merci à Camille Taboulot et Karine Lan pour m'avoir aidé dans la préparation (laborieuse ?) de ma soutenance de thèse.

Pour finir, je souhaite remercier deux personnes que je ne connais pas personnellement : Alexandra Elbakyan pour m'avoir permis d'accéder à la plupart des articles scientifiques

utiles pour avancer dans mes travaux, et Adèle Combes, pour m'avoir permis de me rendre compte à quel point le milieu stimulant et bienveillant dans lequel je me trouvais pendant ma thèse, est précieux et à entretenir.

Merci à vous toutes et tous, ceux cités et ceux oubliés, de m'avoir permis de réaliser ce travail, à la fois intimement personnel et profondément collectif.

Table des matières

Table des figures	iv
Liste des tableaux	viii
1 Introduction	1
1.1 Motivations et contexte	1
1.2 Science de la soutenabilité	3
1.3 Positionnement communautaire	4
1.4 Verrous scientifiques	5
1.5 Objectif et questions de recherche	6
1.6 Plan de thèse	7
2 La transition écologique : discussion sur la place de l'ingénierie	9
2.1 Une nécessaire transition écologique	10
2.1.1 Une remise en cause des conditions d'habitabilité de la planète Terre (transition en termes de diminution des flux d'activités)	10
2.1.2 Une remise en cause des modes de production et d'organisation (transitions en termes de modes de vie)	17
2.1.3 Développement durable et soutenabilité : positionnement par rapport à ces concepts	22
2.2 La place de l'ingénierie dans la transition écologique	24
2.2.1 Influence du milieu culturel dans l'ingénierie (niveau de la structure)	25
2.2.2 Influence du niveau culturel dans la prise de décision chez l'ingénieur (niveau de l'individu)	29
2.2.3 De l'ingénieur humaniste... à l'ingénierie pour la soutenabilité : quels chemins pour la transition ?	34
2.3 Conclusion du chapitre 2	38
3 Étude des artefacts numériques d'ingénierie pour la transition écologique : analyse des adéquations culturelles	41
3.1 Analyse du rôle du numérique dans la transition écologique	42
3.1.1 Transformation numérique : périmètre et impact sur la transition écologique	42
3.1.2 Étude de l'alignement entre les valeurs véhiculées par les artefacts et leurs caractéristiques techniques	48
3.2 Étude des artefacts dans les communautés d'ingénierie et des interactions humains-machines	54
3.2.1 Étude du rôle des artefacts dans les processus d'ingénierie	54

3.2.2	Étude du rôle des artefacts numériques dans les communautés écolologiques	58
3.3	Question de recherche et proposition	63
3.3.1	Construction de la proposition	63
3.3.2	Méthode	64
3.4	Conclusion du chapitre 3	67
4	Vers une permaingénierie	69
4.1	Permaingénierie : positionnement et définition	69
4.1.1	Définition des caractéristiques de la permaingénierie	70
4.1.2	Le paysage de l'ingénierie pour la soutenabilité	78
4.2	L'informatique en tant qu'outil vecteur de changement culturel vers la permaingénierie : définition des caractéristiques	84
4.2.1	Caractéristiques 1 et 2 : éthique du <i>care</i> pour la soutenabilité forte dans les interactions humains-machines	84
4.2.2	Caractéristique 3 : des artefacts numériques d'ingénierie qui s'adaptent aux contextes	85
4.2.3	Caractéristique 4 : des artefacts numériques d'ingénierie renforçant les collaborations	86
4.3	Conclusion du chapitre 4	88
5	Médiatisation de la permaingénierie : zoom sur ACVnum	89
5.1	Outil logiciel au service de l'analyse environnementale	89
5.1.1	Choix de l'analyse de cycle de vie	89
5.1.2	Outil logiciel expert support à l'ACV	92
5.2	Mise en oeuvre du prototype ACVnum	97
5.2.1	Mise en lien du prototype avec les principes de la permaingénierie	97
5.2.2	Choix de conception	100
5.3	Conclusion du chapitre 5	114
6	Méthodologie, expérimentations et résultats	115
6.1	Cadre méthodologique	116
6.1.1	Value Sensitive Design	116
6.1.2	Débat sur les valeurs	117
6.1.3	Trois types d'investigation	118
6.1.4	Correspondance entre les investigations et les expérimentations	119
6.2	Expérimentation en contexte d'apprentissage en ingénierie	121
6.2.1	Présentation de l'expérimentation	122
6.2.2	Résultats issus des questionnaires sur les compétences	126
6.2.3	Résultats issus des entretiens de groupes	140
6.2.4	Synthèse et conclusion de la récolte de données	148
6.3	Expérimentation en contexte de soutenabilité forte	150
6.3.1	Présentation de l'expérimentation	150
6.3.2	Résultats des entretiens individuels (axés sur les valeurs)	152
6.3.3	Résultats issus du <i>focus group</i> : centré sur les pratiques	155
6.3.4	Résultats issus du <i>focus group</i> : centré sur les compétences	157
6.3.5	Synthèse et conclusion de la récolte de données	157

7	Résultats et discussions	159
7.1	Discussion du cadre de la permaingénierie	160
7.1.1	Caractéristique 1 : éthique du <i>care</i>	161
7.1.2	Caractéristique 2 : objectif de soutenabilité forte	165
7.1.3	Caractéristique 3 : interaction des activités d'ingénierie avec une multitude de systèmes (milieux)	167
7.1.4	Caractéristique 4 : expertise interactionnelle et compétences d'ingénierie pour la soutenabilité	175
7.2	Résumé des discussions	181
7.3	Limites des expérimentations	183
7.3.1	Conception du prototype	183
7.3.2	Design des expérimentations	183
8	Conclusion	187
8.1	Contexte et enjeux	187
8.2	Questions de recherche et réponses	188
8.3	Contributions	191
8.3.1	Contributions théoriques	191
8.3.2	Contribution pour la société	191
8.4	Perspectives d'application et de recherche	192
	Bibliographie	195
9	Annexes	209
9.1	Annexe 1 : questionnaires de récolte de données sur les compétences (expérimentation 1)	209
9.1.1	Questionnaire 1 : évaluation des compétences - début du semestre	209
9.1.2	Questionnaire 2 : évaluation des compétences - milieu du semestre	213
9.1.3	Questionnaire 3 : évaluation des compétences - fin du semestre	216
9.1.4	Correspondance des niveaux qualitatifs et quantitatifs pour les questionnaires	220
9.2	Annexe 2 : diagrammes de répartition des réponses aux questionnaires (expérimentation 1)	221
9.3	Annexe 3 : tests statistiques (expérimentation 1)	229
9.3.1	Tests de normalité et test Wilcoxon de rangs signés pour les données quantitatives au sein de chaque groupe (classe, ACVnum, Témoin) entre Qu1, Qu2 et Qu3	229
9.3.2	Tests de normalité et test Mann-Whitney U pour les données quantitatives entre les groupes ACVnum et groupes témoins	232
9.4	Annexe 4 : représentation graphique de l'éco-hameau étudié (expérimentation 2)	234

Table des figures

1.1	Représentation des domaines mobilisés	4
1.2	Verrous scientifiques adressés	5
2.1	Scénarios repris de [Herrington, 2021] montrant les évolutions des systèmes suivants : Population, Pollution, Ressources, Production agricole, Production industrielle	13
2.2	Tendances de 1750 à 2010 des indicateurs agrégés au niveau mondial du développement socio-économique et du système Terre, d’après [Steffen et al., 2015a]	14
2.3	Représentation des limites planétaires d’Azote pour le Stockholm Resilience Center, d’après [Wang-Erlandsson et al., 2022]	15
2.4	Représentation du modèle du <i>Doughnut Economics</i> composé d’un plancher social et d’un plafond environnemental, reproduit et traduit de [Raworth, 2017]	18
2.5	Répartition de 107 pays classés en fonction du respect des limites planétaires et des seuils sociaux de bien-être, d’après goodlife.leeds.ac.uk	19
2.6	Représentation du développement durable et de la soutenabilité forte	23
2.7	Représentation du périmètre du concept de technologie, reproduit et traduit de [Ghoshal et al., 2020]	26
2.8	Typologie quadridimensionnelle des disciplines nourrissant l’ingénierie à travers les époques et les cultures, reproduit de [Dias de Figueiredo, 2014]	30
2.9	Représentation des 3 mondes dans lesquels l’action du concepteur est située, diagramme reproduit et traduit de [Gero and Kannengiesser, 2004]	32
2.10	Modèle liant ingénierie et soutenabilité, reproduit et traduit de [Gagnon et al., 2009]	36
2.11	Système imbriqué de connaissances, reproduit et traduit de [Sterling, 2010] et [Biberhofer et al., 2019]	37
3.1	Représentation des effets de 1er, 2e et 3e ordre des technologies de l’information et de la communication, adapté et traduit de [Berkhout and Hertin, 2004, Hilty and Aebischer, 2015]	46
3.2	Représentation des différents déterminants d’une culture	58
3.3	Niveaux entremêlés de la culture, reproduit et traduit de [Karahanna et al., 2005]	59
3.4	Apparition des différents paradigmes en interaction humain-machine, reproduit et traduit de [Rauterberg, 2015]	60
3.5	Étapes dans le projet de thèse	65

4.1	Les quatre caractéristiques de la permaingénierie	70
4.2	Représentation des interactions entre l'activité de permaingénierie et les éléments locaux et globaux	73
4.3	L'évolution du design pour la soutenabilité (design for sustainability), adapté et traduit de [Ceschin and Gaziulusoy, 2016] et [Bratec, 2020]	74
4.4	Schéma global représentant les quatre caractéristiques de la permaingénierie	77
4.5	Répartition de différentes activités d'ingénierie écologique en fonction de différents critères (intervention humaine, auto-gestion de l'éco-système et potentiel de soutenabilité), adapté et traduit de [Mitsch, 2012].	81
4.6	Répartition des familles d'ingénierie selon un spectre large de compréhension de la soutenabilité	82
5.1	Étapes décrites dans les normes ISO 14040 et 14044	91
5.2	Description de l'interface d'ouverture d'un projet dans openLCA	93
5.3	Description de l'interface contenant les données d'ACV	94
5.4	Différences de périmètre entre les types de logiciels d'ACV	99
5.5	Chemin utilisateur dans l'usage du prototype et ateliers disponibles	99
5.6	Prototype ACVnum	100
5.7	Atelier sur les enjeux de l'ACV réalisée	102
5.8	Partie 1 de l'atelier sur les enjeux de l'ACV	103
5.9	Partie 2 de l'atelier sur les enjeux de l'ACV	104
5.10	Partie 3 de l'atelier sur les enjeux de l'ACV	105
5.11	Chronologie pour remplir l'atelier sur les indicateurs	106
5.12	Partie 1 de l'atelier sur les indicateurs d'impacts	107
5.13	Partie 2 de l'atelier sur les indicateurs d'impacts	108
5.14	Partie 3 de l'atelier sur les indicateurs d'impacts	109
5.15	Différentes sections de l'atelier sur les données	110
5.16	Partie 1 de l'atelier sur les données	111
5.17	Partie 2 de l'atelier sur les données	112
5.18	Partie 3 de l'atelier sur les données	113
5.19	Atelier résultat du prototype ACVnum	113
6.1	Correspondance entre les analyses réalisées et les connaissances produites .	121
6.2	Chronologie autour de la récolte de données dans un contexte pédagogique	124
6.3	Représentation des types de traitements de données et résultats obtenus pour chaque type de données	125
6.4	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire" .	128
6.5	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire" . .	128
6.6	Usage du prototype selon les groupes projets ACVnum	142
6.7	Chronologie de la récolte de données de l'expérimentation en contexte de soutenabilité forte	151
6.8	Positionnement des habitants par rapport à un axe selon leur expertise dans le domaine de l'analyse de cycle de vie	154
6.9	Actions autour des bases de données réalisées au cours de la démarche ACV	156

TABLE DES FIGURES

7.1	Lien entre les connaissances produites et les caractéristiques de la permain-génierie	160
7.2	Représentation des systèmes en jeu dans l'expérimentation 1 et les conflits visibles	174
7.3	Liens entre les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité observés lors des expérimentations	177
7.4	Cadre des compétences pour porter des transformations soutenables dans la société, reproduit et traduit de [Redman and Wiek, 2021]	179
7.5	Schéma général représentant les compétences disciplinaires et les compétences clés d'ingénierie pour la soutenabilité	180
7.6	Représentation des facettes / dimensions de la permaingénierie	182
9.1	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire"	221
9.2	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire"	221
9.3	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Esprit Critique"	222
9.4	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Esprit Critique"	222
9.5	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Compétence Normative"	223
9.6	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Compétence Normative"	223
9.7	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Résoudre des problèmes"	224
9.8	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Résoudre des problèmes"	224
9.9	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Pensée systémique"	225
9.10	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Pensée systémique"	225
9.11	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Connaissance de soi"	226
9.12	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Connaissance de soi"	226
9.13	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Contextualisation et vision du futur"	227
9.14	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Connaissance de soi"	227
9.15	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Compétence Stratégique"	228
9.16	Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Compétence Stratégique"	228

9.17	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la compétence Travail dans un groupe interdisciplinaire concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	229
9.18	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la compétence Esprit Critique concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	229
9.19	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la Compétence Normative concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	230
9.20	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la Résoudre des problèmes concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	230
9.21	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la Pensée systémique concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	230
9.22	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la Connaissance de soi concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	231
9.23	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la Contextualisation et vision du futur (anticipation) concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	231
9.24	Test de normalité et test <i>Wilcoxon-signed rank</i> pour la Compétence Stratégique concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement	231
9.25	Test de normalité et test <i>Mann-Whitney U</i> pour comparaison des groupes ACVnum et témoins (Qu1, Qu2, Qu3 pour toutes les compétences)	232
9.26	Test de normalité et test <i>Mann-Whitney U</i> pour comparaison en fonction des genres (pour Qu1, Qu2, Qu3 pour toutes les compétences)	233
9.27	Schéma de l'éco-hameau étudié	234

Liste des tableaux

1.1	Vision générale de la distribution des questions de recherche, des objectifs scientifiques et niveaux associés des analyses	6
2.1	Indicateurs de permacircularité d'après [Arnsperger and Bourg, 2016]	21
2.2	Mise en relation des dynamiques d'ingénierie et des contextes politiques industriels ou économiques (exemple non-exhaustif)	28
2.3	Description des différents mondes présentés dans la figure 2.9	31
3.1	Nouvelle structuration des indicateurs de la perma-circularité, adapté de [Arnsperger and Bourg, 2016] avec l'ajout du niveau interactionnel	49
3.2	Descriptions des différents impacts du PLM aux niveaux culturel, managérial, opérationnel et au niveau de l'interaction humain-machine	51
4.1	Liste des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité, leur description [Quelhas et al., 2019] et le lien avec les aspects collaboratifs et une expertise interactionnelle	76
4.2	Orientations des familles d'ingénierie envers la soutenabilité d'après [Seager et al., 2012]	79
6.1	Correspondance entre les investigations et les enquêtes de terrain	120
6.2	Répartition des groupes et des outils numériques utilisés	122
6.3	Engagement chez les 38 répondants au questionnaire	126
6.4	Attitude des 38 étudiants envers la technologie	127
6.5	Moyennes et écarts-types de chaque questionnaire (Qu1, Qu2 et Qu3) pour les groupes ACVnum	129
6.6	Significativité (p) des tests Mann-Withney pour comparer les groupes ACVnum et Témoin	130
6.7	Significativité (p) des tests des rangs signés de Wilcoxon réalisées sur les deux parties du semestre et sur le semestre global pour la classe entière et chaque type de groupe (ACVnum et témoin)	131
6.8	Synthèse des résultats issus de l'expérimentation en situation d'apprentissage	149
6.9	Synthèse des résultats issus de l'expérimentation en contexte de soutenabilité forte	157
7.1	Barrières techniques à l'usage de l'ACV et les implications pour la collaboration en ACV	169
7.2	Barrières non-techniques à l'usage de l'ACV et les implications pour la collaboration en ACV	170

9.1 Équivalence entre les réponses qualitatives des questionnaires et les niveaux
quantitatifs définis pour les tests statistiques 220

Introduction

Can design be extricated from its embeddedness in modernist unsustainable and defuturing practices and redirected toward other ontological commitments, practices, narratives, and performances? Moreover, could design become part of the tool kit for transitions toward the pluriverse? What would that imply in terms of the design of tools, interactions, contexts, and languages in ways that fulfill the ontological design principle of changing the ways in which we deal with ourselves and things so that futuring is enabled?

[Escobar, 2018, p.15]

1.1 Motivations et contexte

J'ai réalisé ma thèse entre 2019 et 2022, à un moment où les sciences de la soutenabilité sont structurées au niveau international et en plein essor en France.

Mes motivations pour réaliser cette thèse sont de deux ordres. D'une part, l'usage que j'avais de systèmes informatiques pour des activités d'ingénierie pour la soutenabilité ne me satisfaisait pas. Au cours de ma formation¹, j'ai dû utiliser différents types de logiciels ou de systèmes d'informations, qui m'ont heurté, à la fois dans mes valeurs et dans ma compréhension de l'urgence écologique. D'autre part, j'avais à coeur de mieux comprendre les dynamiques de transition vers des activités humaines *réellement* soutenables. Au début de cette thèse, je ne savais pas comment définir ce terme *réellement*, mais j'avais

1. Ma formation est composée de trois temps : une formation en classe préparatoire littéraire option sciences économiques et sociales, puis un cycle d'ingénieur en systèmes d'information, complété par un master en ingénierie du management et du développement durable. C'est au cours du cycle ingénieur que j'ai commencé à utiliser des logiciels pour des activités d'ingénierie pour la soutenabilité.

l'intime conviction que la soutenabilité n'était pas uniquement une question de calculs et de diminution d'impacts environnementaux, mais plutôt une transformation des manières d'être et des valeurs, aux niveaux individuels et collectifs.

Ces motivations m'ont conduite à comprendre la soutenabilité comme une dynamique de transition. Les artefacts numériques accompagnant les systèmes d'ingénierie sont des supports, des outils, qui doivent être compatibles avec une dynamique de transition soutenable. C'est la raison pour laquelle cette thèse cherche à établir des liens entre l'interaction qu'un individu a avec son artefact numérique et les valeurs culturelles qui émanent de ces interactions. Cette recherche se place dans un contexte où les activités humaines ont entraîné, depuis les années 1950, un déséquilibre du système Terre.

Qu'est-ce que le système Terre ? La Terre peut être comprise comme un ensemble de sous-systèmes, de processus, de "sphères" : atmosphère, cryosphère, lithosphère, hydrosphère ou encore biosphère. Ces sous-systèmes sont en interaction les uns avec les autres. Même si les cultures indigènes ont identifié depuis des milliers d'années que les éléments physiques, chimiques et biologiques de la Terre étaient en interaction et faisaient partie d'un tout, ce n'est qu'au cours de la seconde moitié du XXe siècle que la science a reconnu la forte influence des êtres vivants et notamment des humains, sur la Terre [Steffen et al., 2020].

Ainsi, les activités humaines ont déséquilibré les interactions des sous-systèmes de la Terre, entraînant des changements dans les cycles biogéochimiques (phosphore, azote, etc). Ces perturbations sont telles que les humains ont modifié durablement les conditions de vie sur Terre, rendant certaines zones géographiques progressivement inhabitables. Paul Crutzen, en 2000, propose le concept d'Anthropocène pour définir une nouvelle époque géologique où les êtres humains sont devenus le principal déterminant du changement biosphérique et climatique [Crutzen, 2006]. "L'Anthropocène est devenu un concept unificateur exceptionnellement puissant qui place dans le même cadre le changement climatique, la perte de biodiversité, la pollution et d'autres questions environnementales, ainsi que des questions sociales telles que la forte consommation, les inégalités croissantes et l'urbanisation." [Steffen et al., 2020, p.6]. Ces éléments sont détaillés dans le chapitre 2. Ainsi, une transition soutenable ne pourra pas faire revenir l'humanité dans un système Terre pré-existant au XXe siècle. Cependant, une transition soutenable des activités humaines permettrait d'atténuer les effets dévastateurs de l'Anthropocène et de préparer les sociétés humaines à cette nouvelle époque.

La transition soutenable des systèmes socio-techniques fait l'objet de nombreuses recherches, issues de disciplines variées. Les dynamiques de transition adressent des problématiques environnementales combinées à des problématiques d'éthiques et de justice sociale. Les transitions soutenables sont donc des dynamiques complexes, soulevant des problématiques techniques, organisationnelles et culturelles. Les premiers objectifs de cette thèse ont été de définir comment aborder ces problématiques complexes en science et quels leviers sont pertinents à étudier pour une transition socio-écologique. En accord avec la littérature scientifique, j'ai choisi d'étudier les valeurs qui guident les individus et groupes d'individus dans leurs actions dans des contextes spécifiques [Meadows, 1999], et notamment des contextes d'ingénierie. En effet, je m'intéresse aux dynamiques de transition dans l'ingénierie et comment les valeurs embarquées dans les technologies sont en lien avec les valeurs portées par les acteurs de l'ingénierie. Pour cela, je vais étudier les valeurs, les

manières de comprendre le monde et les objectifs des acteurs de l'ingénierie.

L'ingénierie est une activité intéressante pour notre étude car c'est une activité qui a permis aux humains de développer des technologies environnementalement très impactantes (production de gaz à effets de serre, perturbation des cycles biogéochimiques, destruction de la biodiversité, pollutions chimiques, etc). En effet, il semble que l'ingénierie du XXe siècle ait oeuvré à l'augmentation de la pression des activités humaines sur le système Terre. L'activité d'ingénierie pose l'ingénieur à l'interface entre les systèmes physiques de la Terre (la lithosphère par exemple d'où sont extraits les minerais) et les besoins humains. L'ingénieur est donc en prise avec les systèmes physiques, naturels et sociaux. De ce constat, je fais l'hypothèse que l'ingénieur peut avoir un rôle majeur dans la transition écologique en faisant interagir les systèmes physiques / naturels et humains de manière à ce que les limites du système Terre soient respectées et que le bien-être des êtres vivants (humains et non-humains) soit assuré. Ainsi, l'ingénierie va être étudiée afin de déterminer si cette activité humaine peut être alignée avec les objectifs de la transition soutenable.

1.2 Science de la soutenabilité

Cette thèse s'inscrit dans la science de la soutenabilité. Cette science est un domaine émergeant qui regroupe des chercheurs travaillant sur la compréhension de la relation entre les activités humaines et les systèmes naturels ("comprendre les dynamiques complexes qui découlent des interactions entre les systèmes humains et environnementaux" selon [Clark, 2007]). Les sciences de la soutenabilité sont orientées vers la résolution de problèmes directement ancrés dans une réalité. Les connaissances produites ont donc un but de transformation de la société. Il n'y a pas de définition stricte des sciences de la soutenabilité, même si cette question a été discutée dans la communauté scientifique² [Kajikawa, 2008]. Cependant, les caractéristiques de cette science sont bien définies et sont les suivantes :

- Effort transdisciplinaire : cette science doit être interdisciplinaire (ou au moins se prêter à l'interdisciplinarité) et intégrer les parties prenantes d'un projet. Une des raisons de cet impératif d'interdisciplinarité est d'accélérer le processus de transfert de connaissances vers les acteurs et la mise en oeuvre pratique des connaissances produites [Kauffman, 2009]. De plus, cette interdisciplinarité oblige le fait d'aborder les problématiques d'ingénierie de manière socio-technique ;
- Tourné vers l'action pour transformer le monde : cette science peut être fondamentale ou appliquée mais elle doit être tournée vers l'action (et donc porter des valeurs) [Spangenberg, 2011] ;

2. "In this view, the role of sustainability science is to promote research focusing on sustainability-related issues in each field and to gather the outcomes. Sustainability can work as a symbolic concept to focus attention on an issue. Another interpretation is that sustainability science conducts interdisciplinary research that is not performed sufficiently in each discipline-based science. In this case, sustainability science has an important role in educating and promoting people who have multiple skills and perspectives. The last interpretation is that sustainability science is a distinct discipline engaged in a transdisciplinary effort arching over existing disciplines. In this view, sustainability science will have its own specific body of knowledge and framework with which to address sustainability issues, even while retaining relationships with other disciplines. This paper's stance is based on the latter interpretation." [Kajikawa, 2008, p.2]

- Réflexivité du processus scientifique : cette recherche, bien que tournée vers l'action, doit s'ancrer dans une perspective long-terme dans le sens où ce ne sont pas uniquement les résultats des expérimentations qui doivent être étudiés mais également l'influence de ces résultats sur les sociétés modernes.

La science de la soutenabilité est comprise comme un effort scientifique pour rendre le concept de soutenabilité opérationnel et pour identifier les étapes d'une transition vers une société soutenable [Kauffman, 2009, Spangenberg, 2011]. La question principale des sciences de la soutenabilité est la suivante : à de multiples échelles et au fil des générations, comment la Terre, ses écosystèmes et ses habitants peuvent-ils interagir pour le bénéfice mutuel et la subsistance de tous ? [Weinstein et al., 2013].

Je souhaite rapidement évoquer une distinction conceptuelle nécessaire à l'expression des verrous scientifiques. La soutenabilité est un terme équivoque. C'est la raison pour laquelle il est qualifié de "fort" ou "faible" suivant les contextes. Dans un paradigme de soutenabilité forte, le capital naturel ne doit pas baisser et ne peut être substitué à du capital social, productif ou humain. Au contraire, dans un paradigme de soutenabilité faible, le capital naturel peut être détruit et remplacé par d'autres capitaux. Ainsi, selon les contextes, une activité soutenable peut être plutôt faible ou forte. Cette distinction conceptuelle est présentée plus longuement dans le chapitre 2.

1.3 Positionnement communautaire

Je cherche à produire des connaissances autour de l'ingénierie dans un contexte de transition écologique. Pour cela, j'ai étudié différentes littératures scientifiques abordant la collaboration et la soutenabilité : "Computer Supported Cooperative Work" (CSCW) pour les questions de collaboration ; la conception pour la soutenabilité (*design for sustainability*) et les interactions humains-machines (*sustainable human-computer interaction* ou *sustainable HCI*) pour les problématiques de soutenabilité en conception. La figure 1.1 reprend ces différentes thématiques et champs d'études.

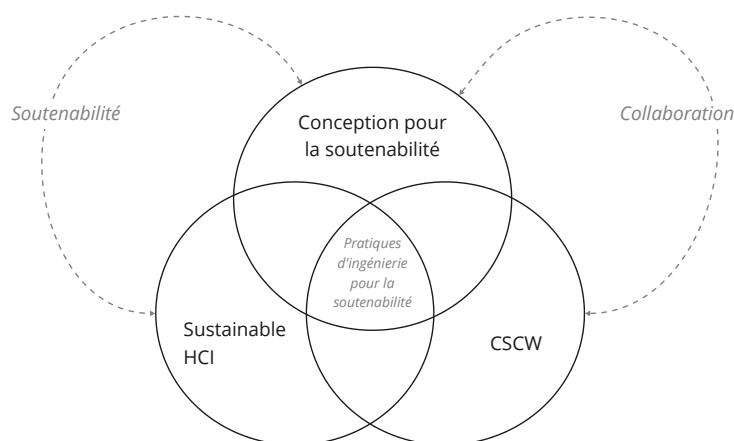


FIGURE 1.1 – Représentation des domaines mobilisés

Cette figure représente les domaines scientifiques mobilisés dans cette thèse. Chaque cercle représente un domaine. Ces domaines se croisent et permettent d'adresser, de manière interdisciplinaire, les pratiques d'ingénierie pour la soutenabilité.

1.4 Verrous scientifiques

Mon étude part de la question suivante : comment l'ingénierie peut évoluer vers des pratiques en cohérence avec un paradigme de soutenabilité forte et quels outils numériques pour cette ingénierie peuvent être conçus ?

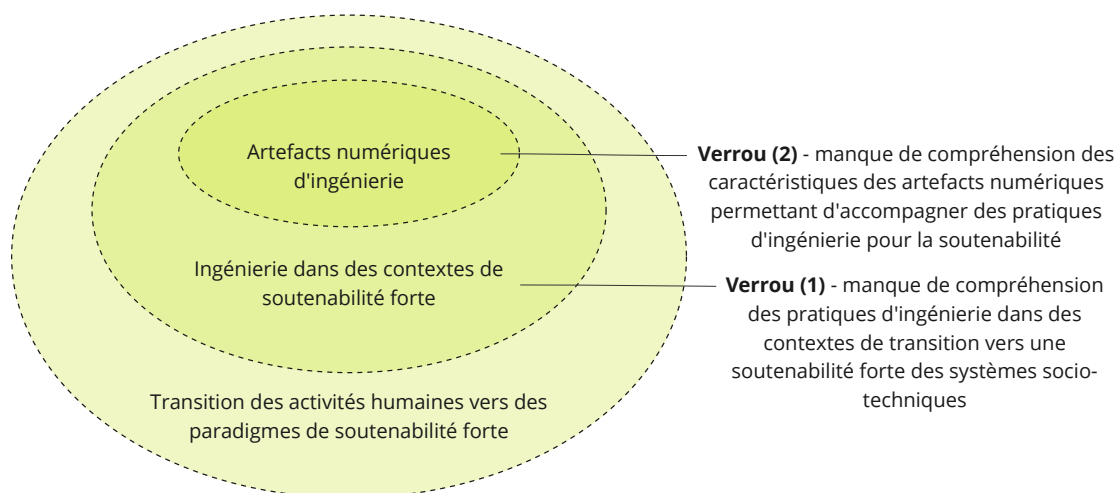


FIGURE 1.2 – Verrous scientifiques adressés

La figure représente les domaines adressés dans cette thèse, de manière imbriquée. Deux verrous sont représentés à droite de la figure. Le premier verrou concerne le domaine de l'ingénierie pour la soutenabilité forte. Le deuxième verrou concerne la conception d'artefacts numériques pour l'ingénierie.

Verrou 1 : Manque d'une compréhension des pratiques d'ingénierie dans des contextes de soutenabilité forte

Le concept d'ingénierie soutenable a été utilisé pour désigner un large spectre d'activités d'ingénierie, allant d'un paradigme plutôt *business-as-usual* à un paradigme de soutenabilité forte. Ainsi, il n'existe pas de cadre d'action clair pour des acteurs de l'ingénierie souhaitant agir dans des contextes de soutenabilité forte.

Je vais donc positionner mes expériences directement dans des contextes de soutenabilité forte et tenter de comprendre comment des processus de conception sont amenés et vécus par les acteurs dans ces contextes.

Verrou 2 : Manque d'outillage de l'ingénierie pour la soutenabilité en contextes de soutenabilité forte

Le concept d'ingénierie soutenable est ambiguë, les caractéristiques des artefacts numériques pour soutenir cette ingénierie soutenable le sont également. Il existe une littérature scientifique émergente sur le *sustainable interaction design* qui permet de développer des connaissances autour des interactions humains-machines soutenables. Cependant, ces travaux s'intéressent peu aux contextes d'ingénierie.

Dans ma recherche, je vais donc étudier des situations d'ingénierie qui mobilisent des outils numériques et des logiciels. Il s'agira d'explicitier le rôle des artefacts numériques dans des processus d'ingénierie pour mieux comprendre comment il est possible de les concevoir en cohérence avec des contextes de transition soutenable.

1.5 Objectif et questions de recherche

Étant donné les verrous scientifiques, l'objectif de cette thèse est le suivant :

Proposer un cadre théorique pour comprendre comment des activités d'ingénierie peuvent exister dans des contextes de soutenabilité forte et explorer les artefacts numériques qui peuvent être déployés en support aux activités d'ingénierie dans ces contextes.

Deux niveaux d'études sont explorés pour répondre à cet objectif : (1) le niveau de l'ingénierie pour la proposition d'un cadre théorique, (2) le niveau des caractéristiques des artefacts numériques d'ingénierie pour la soutenabilité et des interactions entre ces artefacts et les ingénieurs. Chaque question de recherche est présentée ci-dessous. Le tableau 1.1 permet d'avoir une vision générale des questions de recherche, les objectifs scientifiques associés, ainsi que les niveaux d'analyse. La première question de recherche permet d'étudier le rôle que pourrait avoir l'ingénierie au sein d'une société plus soutenable. La deuxième question de recherche permet de préciser ce type d'ingénierie en étudiant les outils et méthodes associées.

TABLE 1.1 – Vision générale de la distribution des questions de recherche, des objectifs scientifiques et niveaux associés des analyses

Thème général	Questions de recherche (QR)	Objectifs spécifiques	Niveaux d'analyses
Étude conceptuelle sur l'ingénierie pour la soutenabilité	QR 1 : Dans un contexte de transition écologique, dans quelle mesure l'ingénierie peut-elle évoluer vers d'autres manières d'être et d'être pratiquée ?	Structurer le champ de l'ingénierie en lien avec la soutenabilité Développer un cadre général autour des principes structurants d'une ingénierie agissant dans le cadre des limites planétaires	Niveau de l'ingénierie
Étude autour de la conception d'artefacts numériques	QR 2 : Quels sont les outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ?	Développer un cadre général autour des principes structurants des artefacts numériques pour une ingénierie dans un contexte de soutenabilité forte Proposer une médiatisation des principes structurants dans le cadre d'expérimentations	Niveau des interactions

Le premier niveau étant centré sur l'ingénierie, une étude théorique de l'ingénierie et des facteurs influençant l'ingénierie est réalisée. Une étude des liens entre ingénierie et transition soutenable est également effectuée afin de mieux comprendre comment l'ingénierie peut évoluer dans un contexte de soutenabilité forte. L'objectif est de préciser un cadre de l'ingénierie pour la soutenabilité. La question de recherche correspondant à ce niveau d'étude est QR 1.

QR 1 : Dans un contexte de transition écologique, dans quelle mesure l'ingénierie peut-elle évoluer vers d'autres manières d'être et d'être pratiquée ?

Le deuxième niveau est centré sur les artefacts numériques d'ingénierie. Pour cela une étude sur les types d'interactions attendus entre praticiens d'une ingénierie pour la soutenabilité et des artefacts numériques est réalisée. L'objectif est de construire un cadre général des caractéristiques à retrouver dans les interactions entre praticiens de l'ingénierie et artefacts numériques pour l'ingénierie, dans des contextes de soutenabilité forte. La question de recherche correspondant à ce niveau d'étude est QR 2.

QR 2 : Est-ce que le numérique a une place dans la transition écologique ? Quels sont les outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ?

1.6 Plan de thèse

Ce chapitre est une introduction générale permettant d'introduire le positionnement et les questions de recherche de mes travaux.

Dans le chapitre 2, l'objectif est de montrer que l'ingénierie va évoluer au contact de la transition écologique. Ce chapitre permet donc de définir le concept de transition écologique et de montrer dans quelle mesure l'ingénierie est une activité humaine poreuse aux valeurs et épistémologies de son époque. Ce chapitre est centré sur le niveau conceptuel.

Dans le chapitre 3, je définis les concepts information, informatique, et numérique. Ce chapitre me permet de montrer dans quelle mesure les outils numériques pour l'ingénierie ont un rôle dans la transmission de valeurs au sein des projets d'ingénierie. Ainsi, si l'ingénierie en tant que discipline a vocation à évoluer, les outils numériques pour l'ingénierie doivent être adaptés pour porter d'autres valeurs et d'autres pratiques, davantage en cohérence avec les objectifs de soutenabilité. Ce chapitre est centré sur le niveau expérimental.

Dans le chapitre 4, je présente ma proposition, c'est-à-dire un nouveau cadre conceptuel pour l'ingénierie pour la soutenabilité, que j'ai appelé permaingénierie. Cette proposition est en deux parties : au niveau de l'ingénierie et au niveau des artefacts numériques.

Dans le chapitre 5, la médiatisation technique est explorée plus précisément. En effet, le prototype testant la proposition de permaingénierie est détaillé et sa conception justifiée. Ce prototype est nommé ACVnum.

Dans le chapitre 6, je présente la méthodologie Value Sensitive Design, méthodologie générale me permettant de tester la proposition de permaingénierie à travers des situations expérimentales autour d'ACVnum. Ce chapitre est l'occasion de présenter les deux expérimentations réalisées et leurs résultats respectifs.

Dans le chapitre 7, il s'agira de synthétiser l'ensemble des résultats obtenus, de les discuter, identifier les limites des expérimentations et de proposer des pistes pour de futurs investigations.

Le chapitre 8, est la conclusion de cette thèse. Cette conclusion reprend les principales contributions de mes travaux et propose des perspectives à la fois scientifiques et technologiques.

La transition écologique : discussion sur la place de l'ingénierie

Une grande part de l'évolution de l'ingénierie résulte de rêves individuels et collectifs au sujet de choses qui n'avaient jamais existé. Les pratiques d'ingénierie peuvent être vues dans une large mesure comme la réalisation et la mise en œuvre de ces rêves.

[Dias de Figueiredo, 2014, p.247]

L'objectif de cette thèse est de comprendre l'évolution possible de l'ingénierie en phase avec l'urgence écologique. Ainsi, ce premier chapitre permet de questionner le rôle de l'ingénierie et des ingénieurs face aux impératifs de la transition écologique. La transition écologique implique une restructuration profonde de la société afin de diminuer la pression que les activités humaines exercent sur le système Terre. Étant donné la place prégnante de l'ingénierie dans les systèmes de production de biens et services dans cette pression anthropogénique, ce chapitre est centré sur le système Terre et le rôle de l'ingénierie dans l'évolution de son fonctionnement. Pour cela, ce chapitre est divisé en deux sections. La première section permet de définir ce qu'est la transition écologique et montrer en quoi cette transition est un changement des fonctions et objectifs actuels de la société. La deuxième section permet de plonger dans l'histoire de l'ingénierie pour mieux comprendre en quoi les problématiques historiques, épistémologiques et géopolitiques impactent la place de l'ingénierie dans la société. Dans chacune des deux sections, je vais montrer en quoi le contexte contemporain influence les pratiques d'ingénierie actuelles et dans quelle mesure le fait Anthropocène devient un contexte structurant aujourd'hui pour l'ingénierie. Ainsi, ce chapitre permet de poser les définitions et le périmètre de mon étude.

2.1 Une nécessaire transition écologique

Cette section a deux objectifs complémentaires qui sont (1) de définir le terme de "transition écologique" et (2) de montrer pourquoi cette transition est une des conditions à la survie des sociétés humaines sur la planète Terre à court terme. Ces deux objectifs sont traduits en trois sections, allant de la description de la situation écologique de la planète Terre (section 2.1.1), pour ensuite exposer les conséquences d'une transition écologique sur les activités humaines, ainsi que les espaces où la diminution des activités humaines et la pérennité du bien-être social se rencontrent dans les modèles scientifiques (section 2.1.2). La transition écologique ne saurait être réduite à une transition environnementale, c'est-à-dire qu'elle ne concerne pas seulement une diminution de l'impact environnemental mais comprend également des éléments sociaux et politiques. Je montre que la transition environnementale va de pair avec une transition des modes de vie. Cela me permet de présenter les différents paradigmes des sciences de la soutenabilité (soutenabilité faible, soutenabilité forte) et de positionner mes travaux de thèse dans l'un de ces paradigmes scientifiques (section 2.1.3).

Dès le début de ce chapitre, le terme de "transition" doit être précisé. La transition est comprise comme un changement dans un système adaptatif complexe qui s'opère à plusieurs niveaux [Geels and Schot, 2007]. Une transition est composée de processus, dynamiques, mécanismes, qui opèrent ensemble pour changer l'état d'un système. Les termes "transition écologique" et "transformation numérique" sont présentés respectivement dans les chapitres 2 et 3. Le terme de transition écologique sert à appuyer le fait de s'intéresser à un sous-système de notre monde, l'ingénierie. Le terme "transformation" sert quant à lui à qualifier la transformation numérique afin d'insister sur les changements à grande échelle engendrés par la prolifération des artefacts numériques. Même si les différences entre les concepts de transition et de transformation [Hölscher et al., 2018] sont réelles, l'emprunt des éléments caractéristiques des études mobilisant le concept de "transformation" pour définir des éléments de la transition écologique est possible, dans la mesure où les deux concepts ne sont pas exclusifs. La transformation numérique est abordée dans le chapitre 3 comme un phénomène pouvant impacter la transition écologique.

2.1.1 Une remise en cause des conditions d'habitabilité de la planète Terre (transition en termes de diminution des flux d'activités)

Au cours du XXe siècle, la communauté scientifique a consolidé de nombreuses connaissances autour du système Terre, passant d'une compréhension analytique à une compréhension systémique de son fonctionnement (les différents systèmes sont étudiés séparément dans une compréhension analytique et les interactions entre ces systèmes sont étudiés dans une compréhension systémique). La perspective historique adoptée permet de comprendre comment les conditions d'habitabilité de la planète ont été remises en cause par les activités humaines et comment les sciences du système Terre se sont développées.

Émergence d'un espace transdisciplinaire pour comprendre le système Terre

Je vais rapidement évoquer l'histoire des sciences du système Terre afin de contextualiser la naissance des connaissances autour de l'Anthropocène et des origines d'une nécessaire transition écologique [Steffen et al., 2020].

La publication *La Biosphère* de Vladimir Vernadsky a permis de formuler l'hypothèse selon laquelle le vivant est une force géologique à part entière et a donc un impact transformateur sur la Terre [Vernadsky, 1998]. A partir des années 1970, de nombreux travaux se sont développés, notamment les travaux de John Lovelock sur l'hypothèse Gaïa [Lovelock and Margulis, 1974] ou le diagramme de Bretherton [Steffen et al., 2020] portant sur la projection du système Terre comme un ensemble d'entités en interaction. En 1983, les sciences du système Terre sont créées, permettant un espace transdisciplinaire entre les sciences de la chimie, de la physique, de la biologie, des mathématiques. L'intégration des sciences sociales est encore en cours, afin que les dynamiques des sociétés humaines puissent être intégrées dans les modèles.

Les travaux des sciences du système Terre portent deux objectifs principaux : (1) définir la résilience du système Terre et les points de bascule du système Terre d'un état à un autre, (2) mieux comprendre les sociétés humaines [Steffen et al., 2020]. Grâce à l'émergence de ce champ d'étude et à la robustesse des conclusions trouvées, des modèles ont pu être consolidés et il apparaît clairement que les activités humaines impactent durablement l'équilibre du système Terre existant depuis 800 000 ans. En effet, Dennis Meadows et ses collègues ont réalisé un modèle mathématique nommé "World3" [Onishi, 2009]. Ce modèle est composé de plusieurs systèmes en interaction : la population humaine, les ressources (non renouvelables), la pollution, l'agriculture et le système industriel [Thissen, 1976, p3]. La question principale posée pour la construction de ce modèle est la suivante : "Comment la population mondiale en expansion et l'économie des matériaux peuvent-elles interagir et s'adapter à la capacité de charge limitée de la Terre au cours de la prochaine décennie?". Ce modèle ne fait pas de prédiction mais permet de comprendre les grandes tendances du système. C'est sur la base de ce modèle que le rapport "The Limits to Growth" décrit 12 scénarios montrant différents futurs possibles pour le développement du monde entre 1900 et 2100 [Meadows et al., 1972]. Les conclusions de ce rapport sont :

- La croissance des différents systèmes que sont la population, le système industriel, le système agricole, la pollution et l'usage des ressources atteindra un pic dans les 100 prochaines années. Une des conséquences les plus probables est une diminution forte de la population et du capital industriel ;
- Les auteurs évoquent une croissance dans un "état d'équilibre", où la population et le capital industriel doivent être constants dans le temps. Ils évoquent également le fait que les activités humaines qui ne requièrent pas un grand stock de ressources non renouvelables ou ne dégradant pas fortement l'environnement pourraient continuer de croître.

Une discussion sur le passage d'un état de croissance à cet état d'équilibre apparaît dans les dernières lignes du rapport. Cette partie n'est pas développée mais soulève plusieurs points dont notamment la nécessité de :

- Récolter davantage de faits pour les éléments scientifiques mesurables et dont nous n'avons pas encore de mesure, notamment dans le secteur de la pollution ;

- Récolter davantage de faits sur les systèmes structurants de notre société : analyse de notre système physique, biologique, psychologique et les relations économiques qui lient ensemble la population humaine, leur environnement et leurs systèmes économiques ;
- Mieux comprendre notre système de valeurs : "La dernière information, la plus insaisissable et la plus importante, dont nous avons besoin concerne les valeurs humaines. Dès qu'une société reconnaît qu'elle ne peut pas tout maximiser pour tout le monde, elle doit commencer à faire des choix. Doit-il y avoir plus de personnes ou plus de richesses, plus de nature sauvage ou plus d'automobiles, plus de nourriture pour les pauvres ou plus de services pour les riches ?" [Meadows et al., 1972, p.181].¹.

Ce travail de thèse se focalise sur ce dernier point qui est la question des valeurs et du lien entre valeurs et pratiques d'ingénierie.

D'autres études ont été menées afin de consolider le modèle World3 aux données réelles [Meadows and Randers, 2004, Turner, 2008]. Ce dernier auteur, sur la période 1970 – 2000 constate que les données historiques observées correspondent au scénario simulé "standard" du rapport original "Limits to Growth" pour la quasi-totalité des résultats indiqués. Pour rappel, ce scénario entraîne un effondrement mondial avant le milieu du XXIe siècle. Enfin, un rapport publié en 2020 [Branderhorst, 2020] montre que les scénarios qui sont encore probables sont :

- Le scénario Business-as-usual 2 (BAU2) qui définit la pollution (phénomènes équivalents au changement climatique) comme la raison de l'effondrement de la société ;
- Le scénario Comprehensive Technology (CT) qui définit le fait que l'innovation technologique va éventuellement causer le déclin des sociétés humaines sans un effondrement de ces sociétés.

Deux autres scénarios avaient été définis, mais les données empiriques s'en éloignent, il s'agit des deux scénarios suivants :

- Le scénario Business-as-usual (BAU) définit le manque de ressources naturelles comme la raison de l'effondrement de la société ;
- Le scénario Stabilized world (SW) définit la stabilisation de la population comme la principale cause de la fin de la croissance économique.

Les scénarios les plus probables (BAU2 et CT) sont représentés dans la figure 2.1. Ces deux diagrammes sont repris de la figure 1 de [Herrington, 2021] tirée des conclusions du rapport [Branderhorst, 2020]. Le scénario BAU2 en 2.1a décrit un scénario où la pollution provoque l'effondrement de la société au milieu du XXIe siècle (effondrement de la courbe "Production industrielle" et "Production agricole" juste avant 2050 et diminution forte de la population). Le scénario CT en 2.1b ne montre qu'un déclin modéré du niveau de bien-être (la courbe "Population" se stabilise, la production industrielle décroît progressivement et la production agricole baisse puis remonte). Pour le moment, il n'est pas possible de savoir quel scénario nous suivons (l'un, l'autre, ou un mix des deux).

1. Version originale de la citation (en anglais), issue du rapport "Limits to Growth", p181 : "The final, most elusive, and most important information we need deals with human values. As soon as a society recognizes that it cannot maximize everything for everyone, it must begin to make choices. Should there be more people or more wealth, more wilderness or more automobiles, more food for the poor or more services for the rich?"

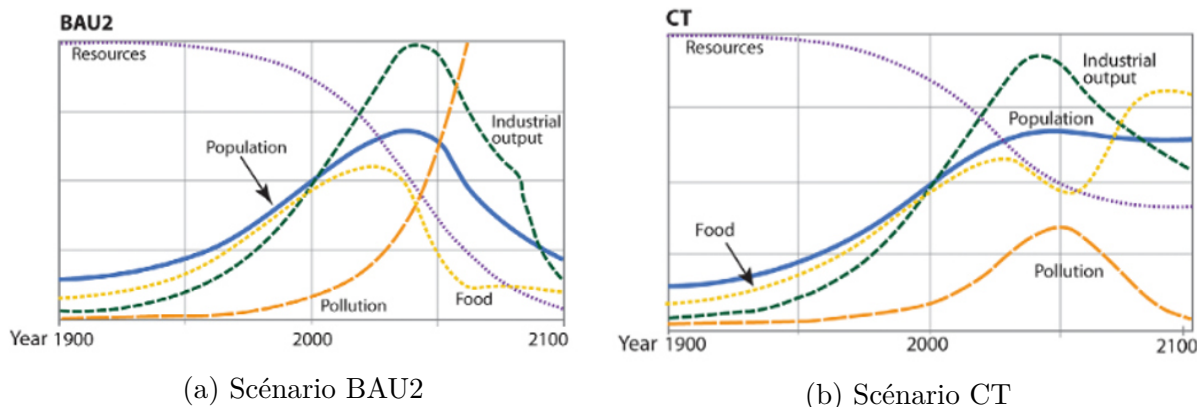


FIGURE 2.1 – Scénarios repris de [Herrington, 2021] montrant les évolutions des systèmes suivants : Population, Pollution, Ressources, Production agricole, Production industrielle

Sur les deux diagrammes, 5 variables sont présentes : Ressources, Population, Pollution, Systèmes agricoles, output industriels. Le scénario BAU2 correspond au scénario où la pollution provoque l'effondrement de la population. Le scénario CT ne montre qu'un déclin modéré du niveau de la population et une diminution de la pollution.

Ainsi, les modèles de 1972 ont été actualisés à la marge avec les données historiques. Cependant, les conclusions initiales ne sont pas remises en cause. A partir des tendances présentées dans le modèle et des conclusions des auteurs, je formule l'hypothèse qu'une modification majeure du modèle de notre société (modification sociale, technologique, ...) semble nécessaire afin de diminuer la pression anthropogénique sur le système Terre. Cette pression anthropogénique croissante est visible grâce aux diagrammes de [Steffen et al., 2015a] repris en figure 2.2. Les diagrammes en 2.2a représentent les tendances socio-économiques entre 1750 et 2010. Les diagrammes en 2.2b représentent les tendances du système Terre sur cette même période. Il est possible d'observer, sur l'ensemble des courbes, une accélération des tendances à la hausse à partir de 1950.

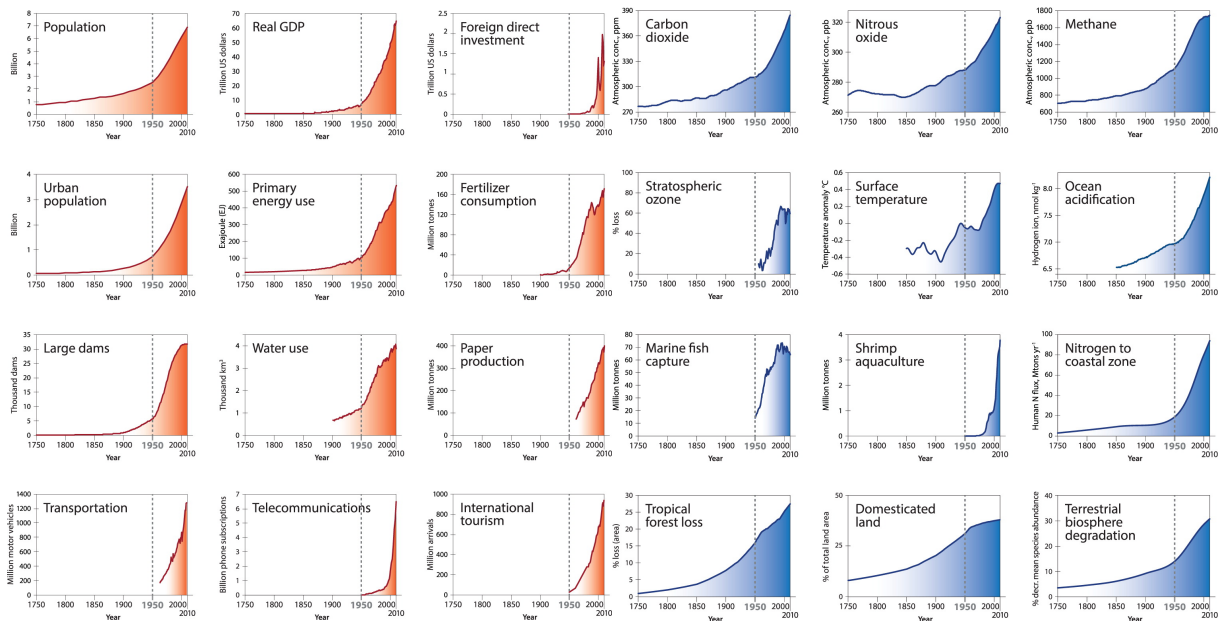
Il semble que l'impact des activités humaines sur le système Terre est tel que nous avons quitté l'Holocène et nous sommes rentrés dans une nouvelle période géologique nommée Anthropocène [Crutzen, 2006, Berry, 1988]². Ce passage de l'Holocène à l'Anthropocène est encore en discussion. Le fait que les activités humaines soient responsables du dérèglement du système Terre n'est pas remise en cause, c'est bien le passage d'une période géologique à une autre qui l'est. Le mot "Anthropocène" vient du grec ancien *ánthrôpos* signifiant "être humain" et *kainos* suffixe désignant une époque géologique. La date du début de cette période géologique n'a pas encore été clairement établie [Ellis, 2021].

Les changements profonds à l'œuvre au niveau des éléments constitutifs du système Terre (atmosphère, biodiversité, hydrosphère), ainsi que l'origine commune de ces changements ont amené à proposer le concept d'Anthropocène pour définir une nouvelle période géologique.

2. Dans le livre de Thomas Berry, il est possible de trouver la citation suivante sur l'état de la Terre : "the anthropogenic shock that is overwhelming the earth is of an order of magnitude beyond anything previously known in human historical or cultural development... We are acting on a geological and biological order of magnitude. We are changing the chemistry of the planet" (1988, p201, 206).

Socio-economic trends

Earth system trends



(a) Développement socio-économique

(b) Évolution du système Terre

FIGURE 2.2 – Tendances de 1750 à 2010 des indicateurs agrégés au niveau mondial du développement socio-économique et du système Terre, d'après [Steffen et al., 2015a]

Les diagrammes en 2.2a représentent, entre 1750 et 2010, l'évolution de la population mondiale, du PIB réel mondial, l'investissement direct étranger mondial en cours, la population urbaine mondiale, la consommation mondiale d'énergie primaire, la consommation mondiale d'engrais, le nombre total mondial de grands barrages existants, l'utilisation mondiale de l'eau, la production mondiale de papier, le nombre de véhicules automobiles neufs par an dans le monde, la somme mondiale des lignes fixes, le nombre d'arrivées internationales arrivées par an.

Les diagrammes en 2.2b représentent, entre 1750 et 2010, l'évolution du dioxyde de carbone, du protoxyde d'azote, du méthane, de l'ozone, des anomalies de température à la surface du globe, de l'acidification des océans, la production mondiale de capture de poissons marins, la production mondiale de crevettes d'aquaculture (utilisé comme indicateur de la modification des zones côtières), le flux d'azote perturbé par les activités humaines, la perte de forêts tropicales, l'augmentation de la superficie des terres agricoles, la diminution en pourcentage de l'abondance moyenne des espèces terrestres.

Le modèle des limites planétaires : un cadre de référence pour penser la transition écologique

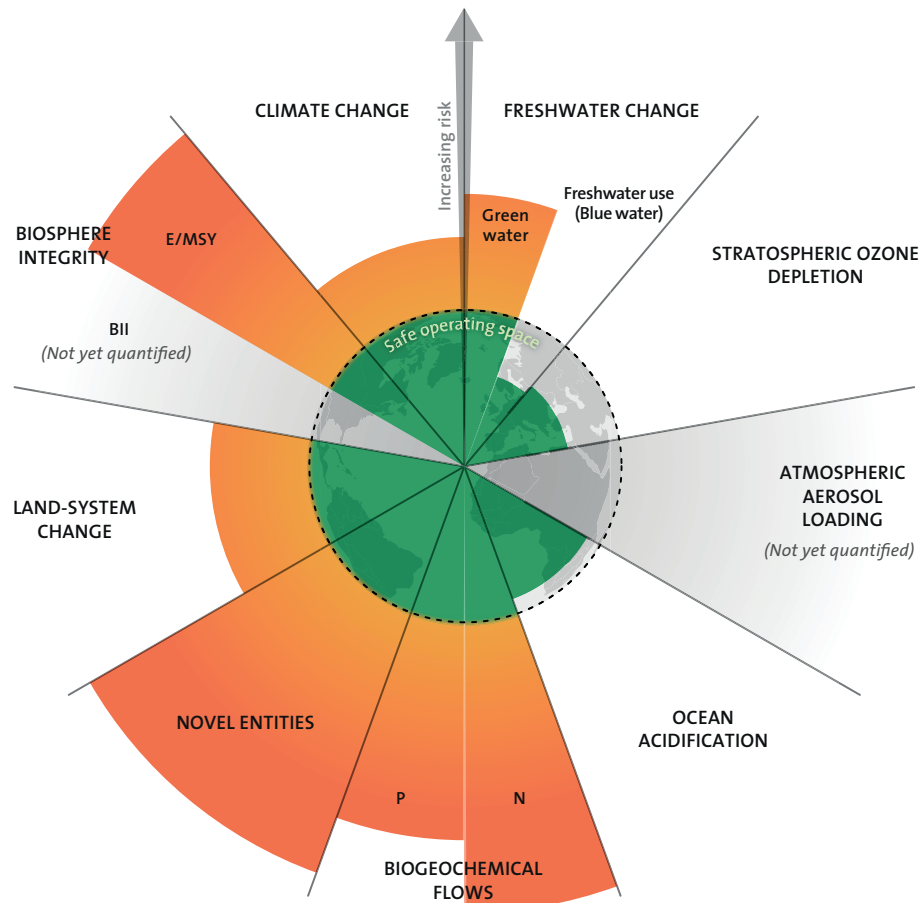


FIGURE 2.3 – Représentation des limites planétaires d'Azote pour le Stockholm Resilience Center, d'après [Wang-Erlandsson et al., 2022]

Cette figure est composée de la Terre en son centre et 9 limites planétaires (1 zone du cercle par limite planétaire). Les 9 limites planétaires sont (en anglais) : *climate change*, *novel entities*, *stratospheric ozone depletion*, *atmospheric aerosol loading*, *ocean acidification*, *biogeochemical flows*, *freshwater use*, *land-system change*, *biosphere integrity*. La limite *atmospheric aerosol loading* est en grisée car cette limite n'a pas encore été quantifiée. Le seuil de chaque limite correspond au rond pointillé. Si le niveau de la limite est en dessous du seuil (donc la ligne pointillée), alors l'humanité reste dans un espace sûr (*safe operating space*). C'est le cas par exemple de la limite *stratospheric ozone depletion*. Si le niveau de la limite est au dessus du seuil, alors l'humanité a dépassé cette limite planétaire. C'est le cas par exemple pour la limite *climate change*. Il est possible de voir que 6 des 9 limites planétaires ont été dépassées. Il existe des incertitudes au niveau des seuils fixés pour chaque limite planétaire. Ces incertitudes font l'objet de travaux et ainsi certains seuils sont mis à jour. Par exemple, le seuil pour le changement climatique était fixé entre 350 to 550 ppm en 2009, et a été ensuite modifié en 2015 pour être entre 350 et 450 ppm. Certains seuils restent complexes à définir, comme celui de la limite "Intégrité de la biosphère".

Les changements profonds du système Terre remettent en cause les conditions d'habitabilité de la Terre car ils mettent en évidence une augmentation de la température moyenne de la Terre ainsi que l'augmentation de l'humidité, ne permettant pas aux humains de vivre en extérieur au-delà d'un certain ratio température – humidité. La transition écologique n'est donc pas comprise dans ce manuscrit comme un développement équilibré entre les éléments économiques, sociaux et l'environnement, mais bien comme une tentative de changer nos modes de vie afin de modifier la tendance actuelle conduisant à l'inhabitabilité d'une partie de la planète Terre.

En 2009, [Rockström et al., 2009a] établissent un cadre scientifique définissant les limites planétaires à ne pas franchir, ainsi que leur seuil, afin de ne pas modifier les conditions actuelles de la vie sur Terre. Ce cadre – ainsi que les valeurs actualisées en 2015 puis 2022 [Persson et al., 2022, Rockström et al., 2009b, Steffen et al., 2015b, Wang-Erlandsson et al., 2022] - est présenté en figure 2.3. L'espace dans le rond en pointillé, au milieu de la figure, est appelé "a safe operating space" et constitue l'espace de maintien des conditions d'habitabilité de la planète Terre telles qu'elles ont été connues au cours de l'Holocène. Franchir un seuil signifie sortir de cet espace de sûreté et donc risquer de déséquilibrer le système Terre, sans que les conséquences de ce déséquilibre ne soient clairement connues [Steffen et al., 2015b]. Ces limites planétaires sont au nombre de neuf : changement climatique, production de nouvelles entités, déplétion de la couche d'ozone, charge d'aérosols atmosphériques, acidification de l'océan, perturbation des flux biogéochimiques, usage de l'eau, changement d'utilisation des sols, perte de l'intégrité de la biosphère.

Conclusion : La dégradation du système Terre remet en cause les conditions d'habitabilité de la planète Terre pour les sociétés humaines actuelles. En effet, cette dégradation peut entraîner des changements importants dans les cycles biogéochimiques, dans les cycles climatiques et entraîner des migrations de populations, des famines, des instabilités géopolitiques, etc.

Dans ce contexte, la transition écologique signifie revenir dans cet espace de fonctionnement environnementalement sûr pour les sociétés humaines au niveau des neuf limites planétaires. La transition écologique implique une diminution des activités humaines ou un changement de ces activités pour assurer une diminution de leurs impacts environnementaux. Cette transformation a des impacts sociaux.

L'Anthropocène peut donc être définie comme une nouvelle période géologique. Certains auteurs ont proposé l'introduction d'une nouvelle ère géologique, notamment l'Ecozoic proposée par Thomas Berry. Pour parvenir à cette nouvelle ère, il s'agirait de réaliser une transition "de l'époque où les humains constituaient une force perturbatrice sur la planète Terre à l'époque où les humains deviennent présents sur la planète Terre d'une manière bénéfique pour les deux parties" [Escobar, 2015, p.453]. Cet extrait fait partie d'un panel plus large de recherches et de discours sur la transition écologique. L'ensemble des études de ce champ montre un nécessaire changement aux niveaux culturel, économique, politique, tant au niveau des institutions qu'au niveau des pratiques. Arturo Escobar a réalisé un état de l'art des "*transition discourses*" [Escobar, 2015]. Ces discours de la transition prennent comme point de départ le fait que la crise écologique actuelle est inséparable du mode de vie dominant depuis le siècle dernier. Ainsi, un de leur points communs est qu'ils appellent tous à un changement significatif de paradigme ou à une

transformation civilisationnelle. C'est ce changement de société qui est abordé dans la section suivante. Ainsi la définition du terme "transition écologique" tel qu'il est compris dans ce manuscrit est complétée au fil des sections.

2.1.2 Une remise en cause des modes de production et d'organisation (transitions en termes de modes de vie)

La discussion menée autour de la remise en cause du modèle de société occidental est structurée en deux sous-parties. Dans un premier temps, il s'agit de montrer comment le modèle des limites planétaires a été intégré dans un modèle plus large prenant en compte le bien-être humain. Ce modèle permet d'établir un lien entre les enjeux environnementaux et les enjeux sociaux. Dans un second temps, une discussion est menée sur les liens entre enjeux environnementaux et sociaux et est l'occasion de préciser la définition de ces derniers. Cette discussion permet d'introduire le concept de culture, concept qui sera utile dans les prochaines sections et chapitres de ce manuscrit.

Lien entre les enjeux environnementaux et sociaux

Retourner sous le seul des limites planétaires (si l'on prend l'hypothèse que cela est possible), implique une transformation radicale des activités humaines afin de diminuer leurs impacts. Transformer nos activités signifie changer les modes d'organisation de ces activités ainsi que leurs objectifs, leurs valeurs, leurs modes de gouvernances, etc. Ainsi, l'ensemble des éléments socio-techniques composant notre entourage est impacté par cette diminution. Le cadre socio-économique actuel pourrait donc être repensé afin d'encadrer la diminution de ces activités et diminuer leurs impacts. La transition écologique est donc comprise comme une transformation des activités socio-économiques. [Raworth, 2017] dans son *Doughnut Economics* propose un modèle où les activités humaines doivent se situer en dessous d'un certain niveau d'impact environnemental (limites planétaires) mais également au-dessus d'un certain niveau social, économique, culturel c'est-à-dire acquérir un certain niveau de bien-être. Ce modèle est présenté sous la forme d'un *doughnut*, en figure 2.4. Cette figure est composée de deux cercles : un plafond environnemental et un plancher social. Il est possible de retrouver à l'extérieur du cercle les 9 limites planétaires qui ne doivent pas être dépassées. De plus, il y a un plancher social à respecter. La transition environnementale doit donc être réalisée tout en assurant une qualité de vie minimale pour l'ensemble des sociétés humaines. L'espace sûr et juste pour l'humanité se situe donc en dessous d'un certain niveau d'impacts environnementaux et au-dessus d'un certain niveau de bien-être humain. Des travaux ont été réalisés afin de récolter des données par pays et d'évaluer la performance du pays relatif aux critères sociaux et environnementaux du *Doughnut* [O'Neill et al., 2018].

La figure 2.5 est un schéma où les pays sont positionnés selon le respect des limites planétaires et de seuils sociaux. Sur cette figure, j'ai défini 4 zones avec des tendances en fonction des seuils sociaux respectés et des limites planétaires transgressées :

- Zone 1 (en bas à gauche) : non-respect des seuils sociaux et faible transgression des limites planétaires
- Zone 2 (en bas à droite) : non-respect des seuils sociaux et transgression des limites planétaires

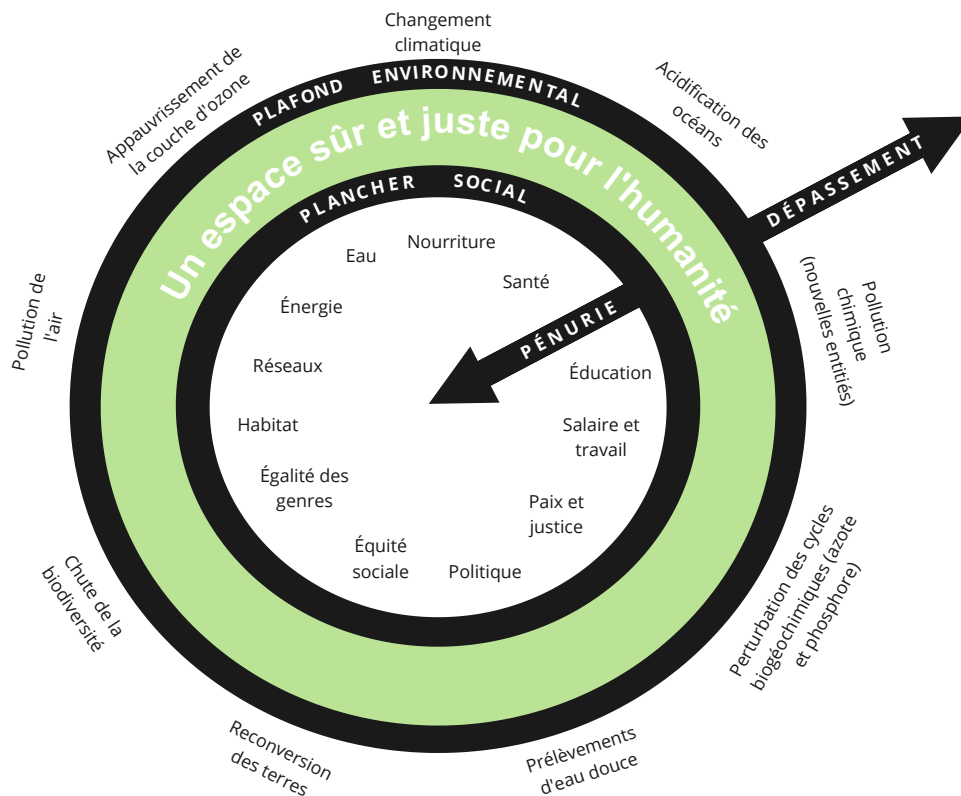


FIGURE 2.4 – Représentation du modèle du *Doughnut Economics* composé d'un plancher social et d'un plafond environnemental, reproduit et traduit de [Raworth, 2017]

Ce diagramme montre le plafond environnemental et le plancher social, deux éléments encadrant un espace "sûr et juste pour l'humanité". Le plafond environnemental est composé des 9 limites planétaires. Le plancher social est composé des éléments suivants : sécurité alimentaire, santé, éducation, revenu et travail (rémunéré ou non), paix et justice, voix politique, équité sociale, égalité des sexes, logement, réseaux, énergie, eau. Dépasser le plafond environnemental tout comme ne pas respecter des seuils sociaux du plancher social conduit à une sortie de l'espace sûr et juste pour l'humanité.

- Zone 3 (en haut à gauche) : respect de certains seuils sociaux et faible transgression des limites planétaires
- Zone 4 (en haut à droite) : respect de certains seuils sociaux et transgression des limites planétaires

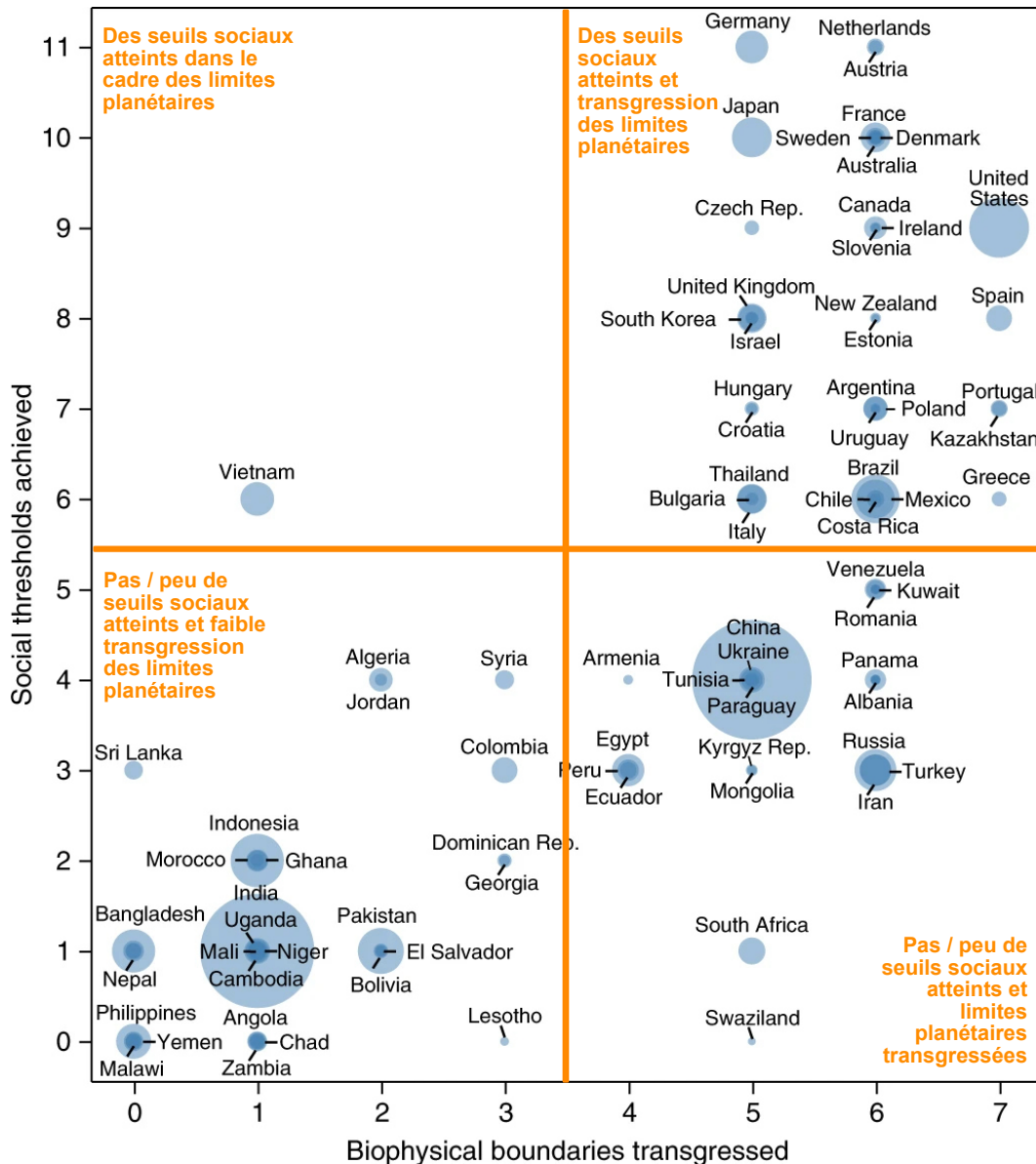


FIGURE 2.5 – Répartition de 107 pays classés en fonction du respect des limites planétaires et des seuils sociaux de bien-être, d'après goodlife.leeds.ac.uk

La figure est un diagramme structuré en deux axes. L'axe des abscisses indique le nombre de limites biophysiques transgressées par pays. L'axe des ordonnées indique le nombre de seuils sociaux atteints par pays. Ainsi, un espace sûr et juste se situe en haut à gauche du diagramme. Ce diagramme permet de voir qu'une tendance semble se dessiner : plus la population d'un pays transgresse des limites planétaires, plus les seuils de bien-être sont atteints (et inversement). Quatre zones ont été délimitées (en orange) pour répartir les pays, en fonction des seuils sociaux atteints et des limites biophysiques transgressées.

D'après la figure 2.5, aucun pays n'arrive à combiner les impératifs sociaux de bien-être et le respect des limites biophysiques de la Terre. Il semble y avoir une tendance : plus les seuils sociaux sont atteints, plus les limites planétaires sont transgressées. La plupart des pays occidentaux se trouvent dans la zone 4.

Un pays semble se démarquer dans ce schéma : le Vietnam. En effet, il est le seul à arriver dans la zone 3, avec uniquement la limite changement climatique dépassée et 6 indicateurs de bien-être social atteints.

Ainsi, il semble que l'augmentation du bien-être d'une population conduit à des impacts environnementaux non-soutenables sur le long terme.

Mes travaux se positionnent dans le domaine des transitions soutenables, en partageant les hypothèses suivantes [Khmara and Kronenberg, 2020] :

- La transition écologique est comprise comme une recherche de nouveaux systèmes de valeurs plus en phase avec un changement soutenable (changement des individus et des institutions) [Kallis et al., 2014, Geels, 2010]
- Les modes de production et de vie non durables (la croissance) sont responsables des crises économiques [Jackson, 2009]
- La transition doit être réalisée de manière démocratique, c'est-à-dire avec un changement socio-économique vers des modes plus équitables de vie [Kerschner et al., 2013]

Partant de ces hypothèses, d'autres systèmes de société pourraient être explorés pour revenir dans un espace sûr et juste pour l'humanité. Afin de les explorer, le point d'entrée choisi est le cadre de la permacircularité de [Arnsperger and Bourg, 2016], avec trois niveaux de transition de la société pour identifier les leviers d'actions. Ces niveaux sont présentés dans la section suivante.

Plusieurs niveaux pour la transition

Dans la précédente partie, il a été montré que le cadre socio-économique actuel est questionné par des auteurs travaillant sur la transition de notre société vers l'intégration des enjeux écologiques dans les modes de vie. Il est intéressant de comprendre le lien entre les impacts environnementaux de la société et les indicateurs culturels de la société. Ces liens peuvent être observés dans le tableau 2.1 avec trois niveaux : (1) au niveau des entités individuelles, (2) au niveau de l'économie d'un pays, (3) au niveau de l'évolution des mentalités d'une population. Ces niveaux sont imbriqués : le niveau individuel s'intègre dans une dynamique économique nationale qui s'intègre elle-même dans une dynamique culturelle plus globale. Il est possible de voir s'il existe des liens entre des activités industrielles (au niveau local) et des activités structurantes. La transition socio-écologique devraient être réalisée sur un plan collectif (structurant) et non uniquement sur un plan individuel, en entraînant des éléments matériels et culturels [Arnsperger and Bourg, 2016]. Les indicateurs accompagnant les trois niveaux sont décrits dans le tableau 2.1 (niveaux haut, milieu, bas).

Ces trois niveaux ne sont pas indépendants. En effet, des évolutions culturelles (de haut niveau) ou des choix de management locaux (au niveau bas) peuvent influencer le niveau intermédiaire. Également, des actions au niveau "bas" sans changer le paradigme de croissance de notre économie (au niveau du milieu) n'aurait pas de sens. Ainsi, le niveau

TABLE 2.1 – Indicateurs de permacircularité d’après [Arnsperger and Bourg, 2016]

Intitulés et niveaux des indicateurs	Descriptif des indicateurs selon les auteurs
"Haut" de la chaîne d’analyse	"... des indicateurs qualitatifs mesurant le degré d’évolution des mentalités vers une sobriété volontaire – même en l’absence de progrès visibles aux deux niveaux précédents. En effet, la mutation collective en direction de la sobriété comme modèle culturel – éventuellement, bien entendu, avec une pluralité d’interprétations possibles selon les options philosophiques, spirituelles, religieuses, psychologiques, etc., des personnes – est une pré-condition nécessaire à la stationnarité macroéconomique."
"Milieu" de la chaîne d’analyse	"... des indicateurs quantitatifs mesurant le degré de stationnarité de l’économie dans son ensemble, c’est-à-dire le ralentissement vers le seuil maximal de 1 % ou 0,5 % des accroissements de demande de ressources non renouvelables, ainsi que la vitesse de convergence vers des taux élevés d’utilisation de renouvelables, le tout dans un contexte de ralentissement de la croissance macroéconomique."
"Bas" de la chaîne d’analyse	"... des indicateurs quantitatifs mesurant de façon traditionnelle les progrès en efficacité, en recyclage, en fonctionnalité, etc., au niveau des entités individuelles et des secteurs de production. À ce niveau, les apports des travaux de la <i>circular economy mainstream</i> – y compris l’écologie industrielle et la <i>cleaner production</i> – peuvent être pris en compte et valorisés."

haut définit les "évolutions socio-culturelles [qui] seraient à impulser" afin de transiter vers une société humaine soutenable. C’est la raison pour laquelle ce travail de thèse est focalisé sur le lien entre les éléments du niveau "haut" (système de valeurs) et la production de techniques. Le paragraphe suivant explicite ce qu’est ce niveau "haut".

Le niveau "haut" suppose la nécessité d’une transformation du modèle culturel dominant et des valeurs humaines importantes au sein de ce modèle culturel. Les valeurs humaines font référence ici à ce qu’une personne ou un groupe de personnes considère comme quelque chose d’important dans leur vie [Friedman et al., 2008, p.80]. Ainsi, dans une société de consommation (caractéristique de la société occidentale de la deuxième moitié du XXe siècle), la possession matérielle, l’achat de biens étaient des éléments importants pour les individus et familles car cela était associé à une certaine forme de réussite sociale (mis en avant par l’effet Veblen³ par exemple [Leibenstein, 1950]).

Conclusion : la transition écologique est comprise comme un changement du modèle culturel qui va accompagner un changement des activités socio-économiques et ainsi une diminution de l’impact environnemental des activités humaines. Ainsi la transition écologique peut être comprise comme une transition culturelle qui va impacter la manière d’agir à la fois des individus et des groupes.

Cette section a permis de compléter la définition de la transition écologique, telle

3. L’effet Veblen caractérise le phénomène selon lequel un bien (bien de luxe généralement) est acheté par des agents économiques pour se positionner dans une classe sociale plus élevée que la sienne (on parle de bien positionnel). Le bien porte une valeur symbolique.

qu'elle est comprise dans ce manuscrit. Les acteurs abordant la transition écologique et la littérature sur le sujet mobilisent différents concepts : développement durable, durabilité, soutenabilité, soutenabilité faible, soutenabilité forte. Ces concepts définissent des ancrages conceptuels différents, ainsi que des hypothèses de travail différentes. Ces termes sont précisés dans la prochaine section afin de préciser l'ancrage de mes travaux.

2.1.3 Développement durable et soutenabilité : positionnement par rapport à ces concepts

L'objectif de cette section est d'expliquer le positionnement de mon travail par rapport aux enjeux du développement durable et de la soutenabilité.

Pourquoi ne pas parler de développement durable

Je n'ai pas utilisé le terme "développement durable". Le développement durable est une expression ayant de nombreuses définitions [Pezzey, 1992], la plus utilisée étant : "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs" [on Environment and Development, 1987, p.41]. Le développement durable est défini comme ayant 3 piliers : le social, l'économie et l'environnement. Il y a deux explications pour justifier l'absence de ce terme dans mon raisonnement.

La première concerne le paradigme dans lequel la notion de développement durable est ancrée. "En accolant un adjectif au concept de développement, il ne s'agit pas vraiment de remettre en question l'accumulation capitaliste, tout au plus songe-t-on à adjoindre à la croissance économique un volet social comme on a pu naguère lui ajouter une dimension culturelle, et aujourd'hui une composante écologique." [Latouche, 2003]. Ce concept de développement est un discours d'origine occidentale "qui a fonctionné comme un puissant mécanisme de production culturelle, sociale et économique du Tiers-Monde" [Escobar, 2015]. Le concept de développement sous-entend une idée de progrès et de croissance économique. Par exemple, le fait de parler de pays comme "sous-développés" oblige à penser le succès d'un pays via des indicateurs rationnels occidentaux (PIB par exemple). Ainsi, le développement ne remet pas en question le modèle capitaliste occidental. Je ne souhaite pas me positionner dans une théorie du développement. Ferguson, dans un livre de 1990, propose une critique du concept de développement en définissant ce concept comme une machine antipolitique ("anti-politics machine") [Ferguson, 1994]. Via l'exemple du développement au Lesotho entre 1975 et 1984, il examine comment le discours autour du développement empêche de questionner le contexte politique de ce développement (le contexte dans lequel il s'inscrit) : quelles sont les raisons de la pauvreté? Quelle est la nature des processus démocratiques? Quels sont les effets de la mondialisation? Étant donné que mes travaux souhaitent questionner la place de l'ingénierie dans un contexte de développement, je ne souhaite pas mobiliser le concept de développement durable. Cela permet de questionner la place des activités d'ingénierie hors des contextes de nécessaire production de biens et de services dans une économie de croissance.

La seconde raison concerne le fait que le développement durable est compris comme un équilibre entre les aspects économiques, sociaux et environnementaux et une négociation entre ces trois piliers. La perspective adoptée dans cette thèse est que l'anthroposphère

(donc l'ensemble des activités humaines) est contrainte par la biosphère et les limites physiques du système Terre. Ce positionnement est explicité dans la section suivante.

La transition écologique n'est donc pas comprise comme une continuité d'un modèle de développement mais bien une rupture culturelle qui concerne principalement le monde dit occidental. La section suivante permet de positionner cette thèse par rapport à deux concepts : la soutenabilité faible et la soutenabilité forte.

Soutenabilité faible et forte

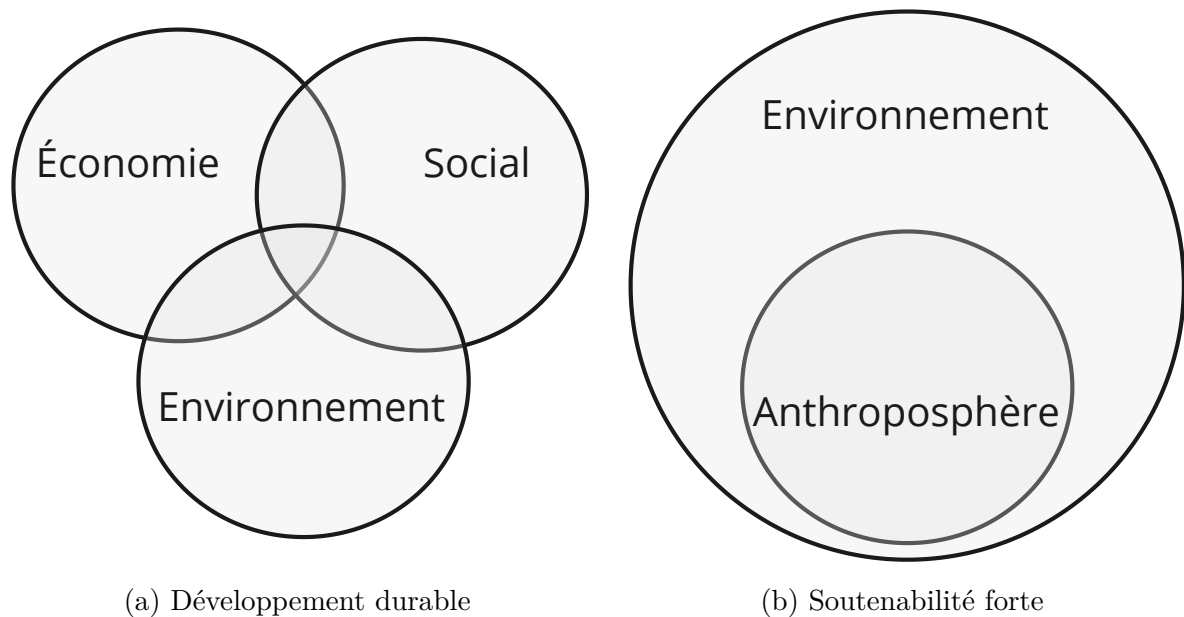


FIGURE 2.6 – Représentation du développement durable et de la soutenabilité forte

Sur la figure 2.6a, le développement durable est représenté comme un équilibre entre la société (économie et social) et l'environnement. Sur la figure 2.6b le paradigme de soutenabilité forte est représenté comme un espace où l'environnement vient contraindre les activités humaines (appelées anthroposphère).

Les sciences économiques ont cadré le problème de la soutenabilité en le référant à la question du bien-être humain. Ainsi, quatre capitaux ont été définis pour maximiser ce bien-être : productif, naturel, humain et social. À partir de ces capitaux, deux visions s'opposent : le paradigme de soutenabilité faible et de soutenabilité forte. Le paradigme de soutenabilité faible propose la possibilité de substituer les capitaux productifs, naturels, humains et sociaux. À l'inverse, dans une posture de soutenabilité forte, "une grande part du capital naturel n'est pas technologiquement substituable et donc remplaçable par des technologies" [Bourg, 2012, p.3] [Dietz and Neumayer, 2007]. Ces deux visions sont représentées dans la figure 2.6. La figure 2.6b représente le développement durable, c'est-à-dire un équilibre entre la société, l'environnement et le social. Je rapproche le développement durable du paradigme de soutenabilité faible car il s'agit d'un équilibre entre trois concepts où l'économie peut momentanément prendre le pas sur les limites environnementales du système Terre. À l'inverse, la soutenabilité forte, représentée dans

2.6b, positionne l'anthroposphère à l'intérieur de l'environnement : les activités humaines sont physiquement contraintes par les limites du système Terre.

Conclusion : la transition écologique, comprise dans un paradigme de soutenabilité forte, nécessite un changement de régime socio-technique. Cette transition est comprise ici comme une nécessité afin d'assurer la survie de l'humanité à court terme sur l'échelle des temps géologiques. Cette transition écologique implique un changement fort sur l'ensemble des champs de la société (culture, politique, vision des non-humains, etc), avec en son centre un impératif de sobriété.

Dans la prochaine section, il s'agit de définir le rôle que pourrait avoir l'ingénierie (et les acteurs de l'ingénierie) dans la transition écologique et quels changements profonds pourraient avoir lieu dans le corps des ingénieurs pour que ce corps jouer un rôle dans la transition écologique. Le choix a été fait de se focaliser sur l'ingénierie car cette activité permet la production de biens et de services et participe activement au dépassement des limites planétaires. Il s'agit de comprendre dans quelle mesure la transition écologique remet en cause les valeurs et les méthodes de travail de l'ingénierie contemporaine.

2.2 La place de l'ingénierie dans la transition écologique

Dans la section précédente, il a été établi que la société actuelle telle qu'elle existe depuis 1950, et qui a ses racines dans la révolution industrielle du XIXe siècle, est à l'origine du dérèglement du système Terre. La transition écologique vient remettre en cause ce modèle de société (économique, social, culturel, politique). Cette remise en cause a un impact sur les modes de production et donc sur les acteurs de notre système de production. C'est la raison pour laquelle je m'intéresse à l'une des activités en lien avec les systèmes de production : l'ingénierie. Cette section montre dans quelle mesure l'ingénierie est une pratique influencée par son contexte d'application. L'objectif est de montrer que l'entrée dans l'Anthropocène (les dérèglements climatiques, la chute de la biodiversité, les mouvements sociaux autour de l'écologie) influence les praticiens de l'ingénierie et donc *in fine* l'ingénierie en tant qu'activité. Afin de montrer cela, cette section est structurée en trois parties : la première partie étudie l'impact du contexte sur l'histoire de l'ingénierie comprise comme une discipline. La deuxième section étudie l'impact du contexte sur l'ingénieur (en tant qu'individu acteur de l'ingénierie). La troisième et dernière partie explore les possibles évolutions de l'ingénierie en prise avec la transition écologique. L'ensemble de la section permet d'adresser les questions suivantes : quels sont les éléments qui influencent et transforment l'ingénierie ? Dans quelle mesure la transition écologique remet-elle en cause le rôle de l'ingénieur ? Quelle transition doit être à l'œuvre chez les ingénieurs pour trouver leur place dans une société vivant à la période Anthropocène ? Répondre à ces questions permet de mettre en avant des valeurs et pratiques portées par les ingénieurs soucieux de la transition écologique, essayer d'explorer les méthodes et outils de ce type d'ingénierie et voir en quoi elles peuvent être porteuses d'un changement de paradigme. Je m'intéresse particulièrement aux artefacts numériques d'ingénierie. En effet, il s'agit de comprendre quels sont les artefacts numériques qui peuvent accompagner

les nouvelles pratiques d'ingénierie et quels types d'interactions humains-machines sont à concevoir pour l'ingénierie en lien avec la transition écologique.

2.2.1 Influence du milieu culturel dans l'ingénierie (niveau de la structure)

Cette première section a pour objectif d'identifier les éléments qui influencent et transforment l'ingénierie. Tout d'abord, il est important de définir ce qu'est l'ingénierie (étymologie, histoire perçue et vécue de l'ingénierie et la relation entre technique et science). Pour cela, je vais revenir sur ce qu'est l'ingénierie afin de poser les définitions de l'ingénierie et de la technologie. Ensuite, avec une étude historique de l'évolution de l'ingénierie dans un contexte culturel spécifique, il s'agit de montrer en quoi l'ingénierie est une activité influencée par le contexte de son époque. L'objectif n'est pas de décrire précisément l'histoire de l'ingénierie mais d'explicitier la relation entre le contexte politique de l'ingénierie et son évolution. La conclusion de cette partie est focalisée sur les liens entre la pratique de l'ingénierie et les contextes politiques, économiques, culturels, épistémologiques.

Définitions

Le mot ingénieur vient du latin *ingenium* qui signifie "puissance de l'esprit, interne et inné, qui, par sa vertu propre nous pousse à trouver la chose, l'inconnu". L'ingénieur est donc celui qui produit des artifices dans le sens où il doit inscrire une idée ou un concept dans de la matière. Ces artifices sont des techniques. En 1141, Gundisalvi donne la traduction issue de l'ouvrage d'Al Farabi de *ingeniis*, qui est : "la science des engins nous enseigne le moyen d'imaginer et d'inventer la manière d'ajuster les corps naturels par un artifice ad hoc conforme à un calcul numérique, de telle sorte que nous en retirions l'usage que nous désirons" [Vérin, 1993, p.72]. Cette pratique de l'ingénierie basée sur une pensée mathématique et abstraite est également détaillée par Dias de Figueiredo (avec des exemples issus de diverses zones géographiques comme la Mésopotamie, l'Égypte ancienne, l'Inde et la Chine). Cette définition, vieille de presque 1000 ans, est-elle encore conforme à l'image que nous avons aujourd'hui des ingénieurs ?

Dans la définition que donne Al Farabi, il semble que l'ingénieur base ses choix de conception uniquement sur des calculs [Vérin, 1993]. Ce travail de thèse ne partage par cette définition de l'ingénierie. En effet, des historiens montrent que les ingénieurs réalisent des choix également en fonction des coûts de la production ou en fonction du contexte historique [Picon, 2004]. Par exemple, [Dias de Figueiredo, 2014] explique que la gestion de projet, donc la gestion des personnes impliquées dans le projet et l'utilisation de représentations graphiques faisaient également partie des pratiques d'ingénierie dès l'Antiquité. De plus, [Picon, 2004] indique que le travail de l'ingénieur repose sur une certaine forme de rationalité. Cette rationalité ne doit pas être comprise comme une logique uniquement basée sur un calcul numérique. Cette rationalité est perméable à certains déterminants : historiques, ontologiques, épistémologiques, sociaux, économiques. Ainsi, Antoine Picon affirme "plus généralement, les ingénieurs semblent être définis par leur ambition à prendre des décisions en fonction d'un ensemble de critères rigoureux, certains de ces critères ont à voir avec des phénomènes naturels, d'autres sont à voir avec la faisabilité économique de leurs projets" [Picon, 2004, p.424]. Ainsi la rationalité de l'ingénieur est perméable à

toutes sortes d'éléments irrationnels.

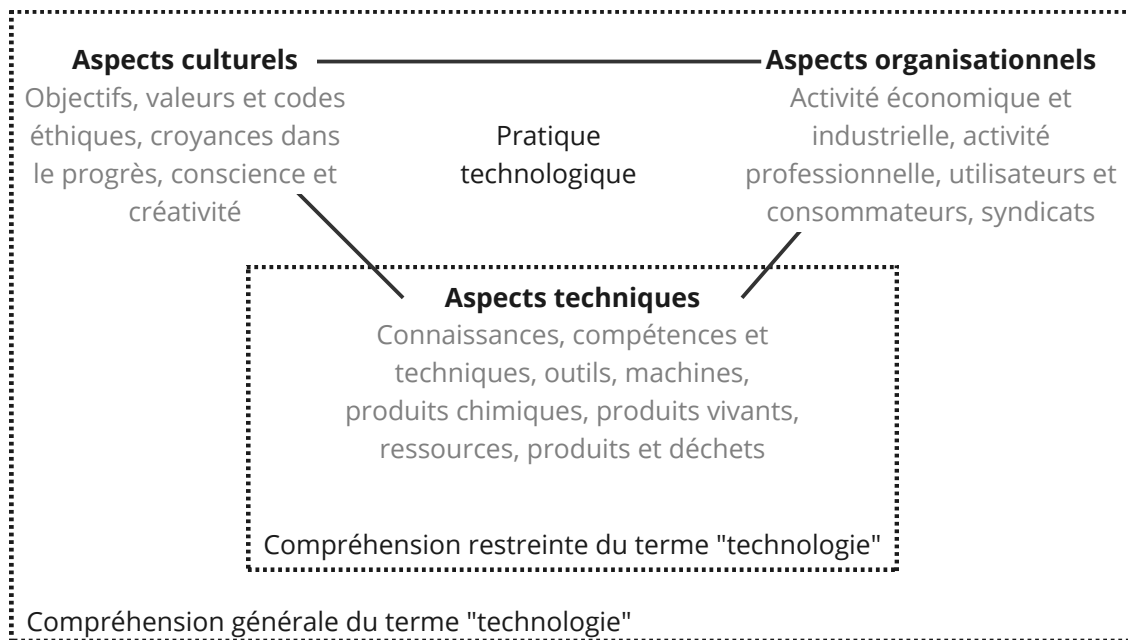


FIGURE 2.7 – Représentation du périmètre du concept de technologie, reproduit et traduit de [Ghoshal et al., 2020]

La figure représente les compréhensions générales et restreintes du concept de technologie. La compréhension large prend en compte les aspects culturels, organisationnels et techniques, tandis que la compréhension restreinte ne prend en compte que les aspects techniques.

Il s'agit de définir ce qu'est la technique et la technologie. Le terme "technique" évoqué dans le paragraphe précédent vient du grec, plus précisément du terme *techné* et signifie "art", "artisanat", "compétence". La technologie est la science, l'étude des techniques. Pour produire des techniques, l'ingénieur s'appuie sur les mathématiques, des lois générales pour concevoir et produire des engins. Dans ce manuscrit, la technologie n'est pas comprise uniquement par son caractère technique. En effet, la technique agit sur l'humain, sur les organisations et sur notre manière de percevoir le monde. Elle vient donc modifier la perception des humains, des groupes sociaux, au niveau individuel et au niveau collectif. La technologie est un acteur de la transition sociale car elle peut conditionner des institutions, des manières d'agir et de penser. Ainsi, la technologie est socialement construite (les humains façonnent la technologie) et elle construit également la société et le rapport au monde (la technologie façonne les humains). La société et la technologie sont intimement liées, s'influencent et co-évoluent [Bijker et al., 1987, Ghoshal et al., 2020, Pacey, 1985].

Cette définition de la technologie rejoint celle plus large de l'ingénierie que nous offre Antoine Picon. La figure 2.7, représente cette définition large de la technologie, avec trois aspects la définissant : l'aspect technique, l'aspect culturel et l'aspect organisationnel. Ainsi la technologie ne peut pas être réduite aux aspects techniques (outils, méthodes, ressources, déchets, compétences, connaissances) mais doit être comprise dans l'ensemble de ses dimensions (économiques, usages, jeux de pouvoir, objectifs, valeurs, codes éthiques, croyances,...). Il est possible de voir que la technologie ne peut pas être restreinte aux

connaissances et compétences techniques d'experts. En effet, la technologie peut être considérée elle-même comme un phénomène culturel et organisationnel.

Influence de la culture dans les pratiques d'ingénierie

L'objectif de cette section est de montrer que la pratique de l'ingénierie a évolué au fil des siècles et ne doit pas se restreindre à une activité uniquement basée sur des choix mathématiques. En effet, je souhaite montrer que l'activité d'ingénierie évolue en fonction de son contexte d'application, notamment le contexte culturel. Pour ce faire, je ne souhaite pas détailler l'histoire mondiale de l'ingénierie mais plutôt prendre un cas particulier. Le périmètre d'étude de cette section a donc été limité à l'ingénierie en France car ce pays peut être considéré comme espace culturel spécifique. En effet, [Picon, 2004] affirme que l'histoire des ingénieurs, leur rôle dans la société et les représentations que les ingénieurs ont d'eux-mêmes est différente selon les pays (la France, l'Angleterre et l'Allemagne par exemple). Dans le cadre de mon raisonnement, je souhaite prendre un contexte culturel en particulier et le choix s'est porté sur le contexte français⁴ car il est documenté dans la littérature.

Entre le XVe et XXIe siècle, le corps des ingénieurs et la manière de penser l'ingénierie ont évolué. Cette évolution est intéressante car elle permet d'affirmer que l'ingénierie peut évoluer au fil des contextes. Cette histoire des ingénieurs n'est pas linéaire et diffère selon les pays ou les spécialités des ingénieurs.

Du début du XVe siècle jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, "les ingénieurs sont au service du roi. Au XIXe siècle, l'ingénieur civil apparaît en France, au service de l'organisation industrielle. On pourrait dire que la machine-outil lui est ce que le canon fut aux ingénieurs du XVIe siècle, ce qu'est l'ordinateur à nos contemporains : l'instrument d'une mécanisation de l'activité humaine." [Vérin, 1993, p.10] Dans ce manuscrit, je soutiens l'hypothèse que la technologie n'est pas neutre et que le rôle joué par le corps ingénieur ne l'est pas non plus. En effet, l'ingénieur est au service d'un projet politique : par exemple, le roi s'est servi du corps ingénieur pour asseoir son pouvoir, notamment par les machines de guerre. Hélène Vérin écrit "la dénomination d'ingénieur accordée à certains "artifices" semble bien liée aux efforts de centralisation du pouvoir politique. C'est le roi – ailleurs le prince, le duc, l'empereur – qui accorde ce titre à certains maîtres, dans la mesure précise où leurs artifices et leur "engin" servent à exercer l'emprise royale sur des territoires" [Vérin, 1993, p.61]. Dans ce contexte, l'histoire des ingénieurs est intimement liée à l'histoire de la guerre et plus particulièrement aux machines de guerre.

La figure de l'ingénieur moderne naît au début du XVIIIe siècle, avec l'évocation dans le Dictionnaire de l'Académie française de 1740 de l'évolution du rôle de l'ingénieur. En effet, ce dernier est défini comme conduisant d'autres ouvrages que les ouvrages militaires [Vérin, 1993, p.36]. Cet ingénieur est un héritier à la fois de la tradition médiévale des maîtres-bâisseurs et spécialistes des engins de guerre, de l'idéal Antique véhiculé par les monuments romains et de la tradition vitruvienne. Cet héritage va agir sur l'image que les ingénieurs ont d'eux-mêmes aujourd'hui et sur la manière dont la profession est perçue. Selon Antoine Picon, l'histoire des ingénieurs français a eu pour conséquence le fait que ces ingénieurs se voient comme des figures politiques en charge du bien public. A partir

4. Le choix du contexte culturel français ne veut pas dire qu'un contexte culturel doit être réduit à un contexte national. Le concept de culture sera présenté dans le chapitre 3.

du XVIIe siècle et jusqu'à aujourd'hui, les ingénieurs se sont professionnalisés, avec un corps d'ingénieurs civils qui s'est développé en parallèle des ingénieurs militaires, ainsi qu'avec une multiplication des champs d'ingénierie (électrique, chimie, etc). C'est en 1828 que l'École centrale des arts et des manufactures est ouverte pour former spécifiquement ces ingénieurs civils. La professionnalisation et diversification des champs d'ingénierie met encore plus à mal la possibilité d'expliquer une histoire linéaire des ingénieurs^{5 6}.

TABLE 2.2 – Mise en relation des dynamiques d'ingénierie et des contextes politiques industriels ou économiques (exemple non-exhaustif)

Intitulés et niveaux des indicateurs	Ingénierie	Contexte
14e - Aujourd'hui	Ingénieur militaire : conception et construction de machines de guerre	Constitution du royaume de France, création de machines de guerre pour les Princes
19e - Aujourd'hui	Naissance de l'ingénieur civil au service de l'industrie	Société de production et de consommation de masse
Aujourd'hui - ?	À quoi ressemble un ingénieur agissant pour la transition écologique ?	Entrée dans l'Anthropocène, crise écologique

Depuis la loi du 10 juillet 1934 (complétée par le décret du 23 mai 1951), ce n'est plus un roi qui octroie le titre d'ingénieur mais une institution étatique : la Commission des Titres d'Ingénieurs (CTI). La profession des ingénieurs et leur formation sont aujourd'hui contrôlées par cet organisme. Cette réglementation a été progressive dans les années 1930 à 1950 et permet d'accréditer les centres de formation d'ingénieurs. Le modèle de l'ingénieur dont nous héritons aujourd'hui est l'ingénieur au service d'une industrie produisant en masse, dans une perspective de consommation de masse. Le tableau 2.2 illustre succinc-

5. Mais est-ce qu'une "histoire linéaire de l'ingénierie" est une réalité? Antoine Picon affirme "L'ingénierie ressemble plus à un continent marqué par des contrastes frappants qu'à un domaine unifié" [Picon, 2004, p.422] ou encore "L'autonomie relative de l'histoire de l'ingénierie ou de certaines des histoires possibles de la profession d'ingénieur, de l'art, de la science et de la réalisation, par rapport au rythme général scientifique et industrielle n'est pas le seul problème auquel l'historien est confronté. L'histoire de l'ingénierie, ou plutôt les histoires, est également marquée par un labyrinthe complexe de discontinuités. Il n'est pas facile de considérer simultanément l'artiste ingénieur de la Renaissance et l'employé d'une des grandes entreprises d'aujourd'hui. Même si l'on se limite à la période moderne, l'histoire de l'ingénierie semble marquée par des discontinuités qui ne sont pas faciles à surmonter." [Picon, 2004, p.428] ou

Il n'est pas facile de considérer simultanément l'artiste ingénieur de la Renaissance et l'employé d'une des grandes entreprises d'aujourd'hui. Même si l'on se limite à la période moderne, l'histoire de l'ingénierie semble marquée par des discontinuités qu'il n'est pas facile de surmonter."

6. Je devrais parler *des* ingénieurs et non *de* l'ingénieur car la figure de l'ingénieur est plurielle. En effet, il existe autant d'ingénieurs que d'époques, que de pays. Certains ingénieurs étaient plus portés sur les calculs mathématiques tandis que d'autres davantage sur les aspects organisationnels. D'autres encore donnaient la primauté à la beauté des constructions plutôt qu'à leur aspect fonctionnel. Si l'on s'intéresse aux ingénieurs issus du monde du clergé au Moyen-Âge, Dias de Figueiredo affirme que ces ingénieurs étaient plus enclins à porter une attention à l'esthétique, aux symboles : "Cela explique pourquoi l'esprit de l'ingénieur (européen) médiéval était façonné par une culture qui transcendait les solutions pragmatiques pour contempler, à travers l'expérimentation, des idéaux de créativité et de beauté ainsi qu'une aspiration à la perfection se rapprochant autant que possible de l'idéal divin [Pacey, 1992, p.8-9]" [Dias de Figueiredo, 2014]

tement cette relation entre la définition de l'ingénierie et le contexte politique, économique et écologique de chaque époque.

Conclusion : L'ingénierie est une activité permettant la conception et la production d'objets techniques. Cette activité est au service des différents projets politiques contemporains. Ainsi, le corps ingénieur est poreux aux enjeux de son époque. Les événements historiques, contextes religieux, politiques influencent et transforment l'ingénierie. De même la technologie est composée d'éléments culturels, organisationnels et techniques. Cette composition plurielle lui confère une certaine complexité et une capacité à transmettre des connaissances, des normes, des valeurs. Ainsi l'interaction entre un ingénieur et ses artefacts peuvent l'influencer ou le conditionner dans une certaine pratique.

La porosité de l'ingénierie aux contextes historique va être détaillée dans la prochaine section, en explorant la rationalité de l'ingénieur. Cela sera l'occasion d'aborder l'influence de la culture au niveau d'un acteur de l'ingénierie : l'ingénieur.

2.2.2 Influence du niveau culturel dans la prise de décision chez l'ingénieur (niveau de l'individu)

L'ingénierie a évolué en fonction des événements contemporains. Il s'agit à présent de s'intéresser à l'impact du contexte culturel sur les ingénieurs. Cette section va permettre de répondre à la question : quelle transition doit être à l'œuvre chez les ingénieurs pour trouver leur place dans une société vivant à la période Anthropocène ?

Des concepts et modèles issus du périmètre de l'ingénierie de la conception vont être mobilisés. Ce périmètre est en partie superposé à l'activité d'ingénierie car l'acte de conception dans les systèmes de production mobilise en partie une pratique d'ingénierie. Il s'agit, dans une première section, de préciser l'espace de l'ingénierie et celui de la conception. Dans une deuxième section, il s'agit de mobiliser un cadre conceptuel de conception située afin de comprendre l'impact de la perception individuelle dans l'acte de conception (contexte autour de l'individu dans une activité de conception). Enfin, dans une troisième et dernière partie, je montre en quoi la rationalité de l'ingénieur ne doit pas être confondue avec le concept de logique et que cette rationalité est traversée par de nombreux éléments (historiques, épistémologiques, etc).

Différence entre ingénierie et conception

Dans quelle mesure ingénierie et conception sont-elles liées ? Selon [Dias de Figueiredo, 2014], les premières pratiques d'ingénierie se sont développées autour de quatre tendances, représentées dans la figure 2.8 : (1) les pratiques d'ingénierie sont nées des pratiques de l'artisanat et de la culture de l'artisanat, (2) les pratiques d'ingénierie sont nées autour du travail de conception, (3) les pratiques d'ingénierie reposent et mettent en œuvre des calculs mathématiques, des dessins et des modèles, (4) les pratiques d'ingénierie mobilisent les sciences sociales pour la bonne organisation et gestion des personnes impliquées dans les processus de conception. Toujours selon Dias de Figueiredo, ces quatre tendances sont également présentes dans les pratiques d'ingénierie de la Grèce et de la Rome classiques.

La conception était comprise comme "la capacité à concevoir de nouvelles solutions", au niveau des projets de bâtiments, d'infrastructures pour la gestion des eaux, des routes, etc. Cependant ces tendances sont présentes à différents niveaux dans les cultures. Par exemple, en Grèce et Rome antiques, la dimension sociale des pratiques d'ingénierie était particulièrement présente. Il s'avère que les raisons de cette forte présence de la dimension sociale sont différentes selon le milieu grec et le milieu romain. En effet, en Grèce, les théories abstraites sont particulièrement développées et donc nous aurions pu penser que la dimension scientifique de la pratique d'ingénierie était prépondérante. En réalité, ces théories scientifiques ont échoué à se diffuser aux pratiques d'ingénierie de l'époque. Pour les Romains, c'est leur mode d'organisation existant (la gestion des travailleurs par les ingénieurs par exemple) qui a permis le développement de cette dimension sociale. Du côté de la conception, ce sont les dessins, la modélisation qui ont été une aide au développement de la pensée : "En ce sens, ils [les dessins et textes pour soutenir le raisonnement] représentent une rupture majeure dans les pratiques d'ingénierie : l'exploration de l'art du croquis, du dessin et de la modélisation – c'est-à-dire la conception – comme une puissante aide à la pensée [Buxton, 2010, p.105]. L'utilisation du cahier comme forme d'enregistrement personnel systématique de l'avancée d'un ingénieur dans ses projets constituait une autre innovation dans les pratiques d'ingénierie de la Renaissance italienne qui s'est également étendue aux pratiques scientifiques." [Dias de Figueiredo, 2014, p.12]. C'est à la Renaissance que le travail de conception contribue à l'évolution des pratiques d'ingénierie.

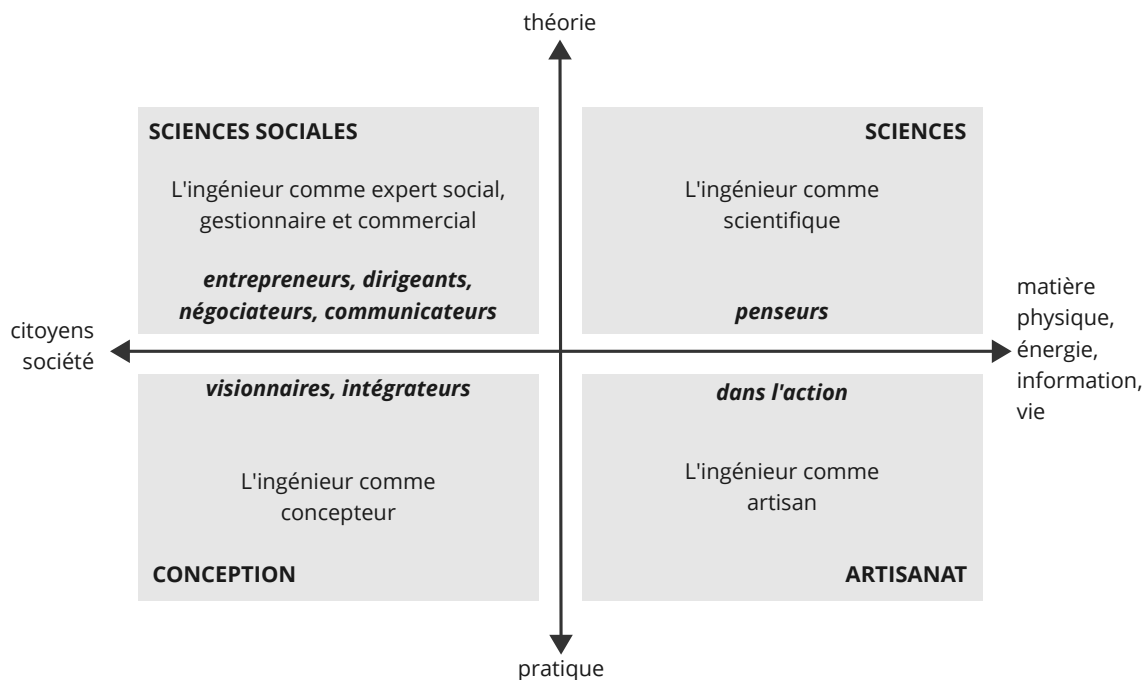


FIGURE 2.8 – Typologie quadridimensionnelle des disciplines nourrissant l'ingénierie à travers les époques et les cultures, reproduit de [Dias de Figueiredo, 2014]

La figure représente les quatre dimensions composant l'ingénierie positionnées sur deux axes. L'axe des abscisses va de la pratique à la théorie, tandis que l'axe des ordonnées va des systèmes sociaux (citoyens, société) aux systèmes physiques (matière physique, énergie, information, vie). Les quatre dimensions sont les suivantes : sciences sociales, sciences, conception, artisanat. Pour chaque dimension, des exemples sont donnés.

La conception est donc comprise ici comme l'un des attributs de la pratique d'ingénierie.

Le monde perçu de l'ingénieur

[Gero and Kannengiesser, 2004] expliquent qu'en ingénierie de la conception, les agents acteurs d'une situation de conception ne sont pas statiques. En effet, les auteurs expliquent qu'une situation de conception provient de la réception du monde externe (*external world*), de l'interprétation que le concepteur fait de ce monde (*interpreted world*), et de la manière dont le concepteur souhaite agir sur ce monde (*expected world*). Le tableau 2.3 reprend les descriptions des trois mondes. Ainsi, la manière dont le concepteur perçoit et souhaite agir sur ce monde externe à lui est influencée par les facteurs historiques, sociaux, économiques, culturels (expliqués dans la section précédente). Cette manière de percevoir et d'agir sur le monde est représentée dans la figure 2.9.

TABLE 2.3 – Description des différents mondes présentés dans la figure 2.9

Monde	Description
Monde externe	"... le monde qui est composé de représentations extérieures au concepteur"
Monde interprété	"... le monde qui est construit au sein du concepteur en termes d'expériences sensorielles, perceptions et concepts. C'est la partie interne, une représentation interne de la partie du monde externe avec laquelle le concepteur interagit."
Monde attendu	"... est le monde que les actions imaginées par le concepteur va produire. C'est l'environnement dans lequel les effets des actions sont prédits en fonction des objectifs actuels et des interprétations de l'état actuel du monde"

L'anthroposphère (société et technique) et la biosphère font partie du monde externe et se retrouvent bien entendu dans le monde interprété et le monde attendu. Ainsi, la rationalité individuelle des ingénieurs est influencée. Cette rationalité est l'objet de la prochaine section.

Rationalité de l'ingénierie

Dans cette section, il s'agit de montrer comment la rationalité de l'ingénieur influence sa manière de proposer des solutions d'ingénierie et donc d'agir par rapport à la transition écologique.

Je souhaite revenir sur le cas de l'évolution de l'ingénierie en France à partir du XVe siècle, l'histoire des ingénieurs, leur origine et le rôle qu'ils ont joué dans la constitution de l'État français moderne. L'histoire française a joué un rôle dans la constitution de l'image que les ingénieurs ont d'eux-mêmes en tant que corps de métier : "l'imagination de l'ingénieur est intimement liée au système d'images qui prévaut dans la société dont il fait partie. En d'autres termes, l'imagination de l'ingénieur apparaît comme une composante de l'imagination sociale" [Picon, 2004, p.431]. Finalement, c'est la rationalité évoquée plus haut et l'histoire de l'ingénierie, ainsi que sa position sociale qui vont avoir un impact sur la manière dont celui-ci va vouloir agir sur le monde et son imaginaire. [Picon, 2004, p.431]

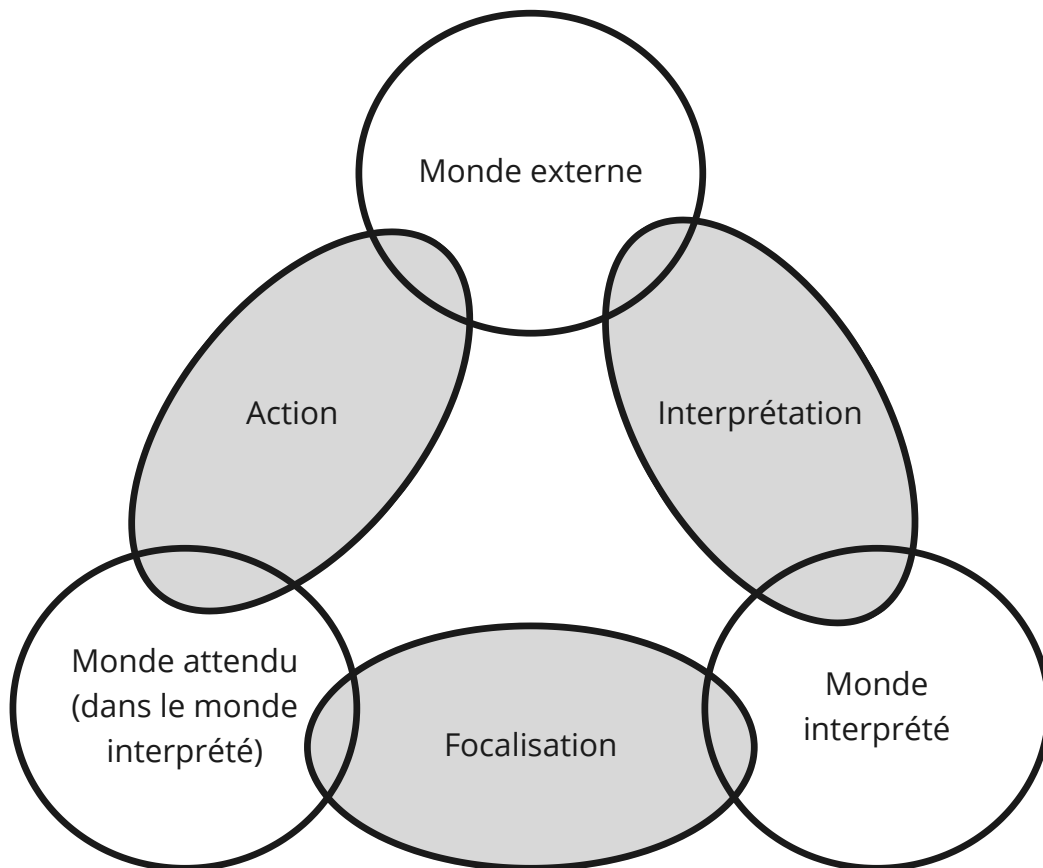


FIGURE 2.9 – Représentation des 3 mondes dans lesquels l'action du concepteur est située, diagramme reproduit et traduit de [Gero and Kannengiesser, 2004]

Trois mondes sont représentés sur la figure : le monde externe, le monde interprété, le monde attendu. Ces mondes sont reliés par des actions (action, interprétation, focalisation). Le monde externe est interprété par le concepteur qui va construire ainsi son monde interprété. Puis, le concepteur va se focaliser sur des éléments du monde interprété (expression d'un jugement) pour construire un monde attendu. Enfin, le monde externe est modifié en fonction du monde attendu construit dans l'imaginaire du concepteur.

montre que rationalité et imagination sont deux concepts liés : "La rationalité est inséparable de l'imagination. A l'intersection des deux, on trouve entre autres les notions clés d'efficacité et d'efficience. Contrairement à ce que postule la plupart des ingénieurs dans leur volonté de fonder leur pratique sur une science indiscutable et sur une rationalité anhistorique, l'efficacité et l'efficience sont des notions culturellement construites. Tout comme les mathématiciens, qui ne considèrent pas que toutes les démonstrations sont équivalentes, les ingénieurs sont, à un moment donné, plus enclins à certaines solutions qu'à d'autres. Les meilleures solutions censées être à la fois efficaces et efficaces s'inspirent des représentations de ce qui compte vraiment dans le monde physique." Et Antoine Picon termine sa citation par un appel à questionner certaines normes actuelles de l'ingénierie comme l'efficacité : "Ainsi, l'histoire des conceptions successives de l'efficacité et de l'efficience par les ingénieurs est indissociable de ces représentations que nous appelons habituellement la nature. Malgré l'appel de Bruno Latour à une critique radicale de la notion même de nature, il est probablement impossible de s'en débarrasser entièrement puisqu'elle permet à des figures professionnelles comme les ingénieurs de donner un sens à leurs démarches" [Picon, 2004, p.431]. La manière de percevoir le monde définit la manière de comprendre un problème et de le formuler. Cette formulation impacte directement les solutions apportées.

[Klotz et al., 2018] démontrent en quoi le fait de poser un problème peut induire des réponses inadaptées en termes de transition écologique. En effet, ils donnent l'exemple suivant : poser le problème de "l'autoroute n'a pas assez de voies" est une manière réduite d'exprimer un problème qui pourrait être exprimé par "on met trop de temps pour se rendre au travail". La première manière d'exposer le problème ferme les possibilités de diminution de l'usage de la voiture individuelle. La deuxième formulation du problème est plus ouverte aux possibilités de mettre en place davantage de transports en commun ou du télétravail pour réduire l'usage de la voiture individuelle et la dépendance aux énergies fossiles. Ainsi, les croyances de l'ingénieur sont sur l'ensemble du processus d'ingénierie : la compréhension d'un problème, sa formulation, les propositions faites, choisies et implémentées [Klotz et al., 2018].

<p>Conclusion : L'ingénierie est une activité évoluant en fonction des croyances, des cultures contemporaines. Les croyances qui animent les ingénieurs influencent leur compréhension des problématiques d'ingénierie, ainsi que la manière de les résoudre. L'entrée dans l'Anthropocène et la nécessaire transition écologique sont des éléments qui peuvent influencer les ingénieurs dans leur compréhension des problèmes d'ingénierie. La transition à l'œuvre chez les ingénieurs devrait être une transition permettant d'affecter leur rationalité et leurs imaginaires.</p>

Cette porosité entre les croyances contemporaines et les pratiques d'ingénierie pose la question de l'impact de l'Anthropocène sur l'ingénierie. Étant donné les changements profonds nécessaires pour mettre en oeuvre la transition écologique, cela pourrait avoir un impact profond sur la manière de comprendre des problèmes d'ingénierie, de les exprimer et de proposer des solutions. La prochaine section a pour objectif d'explorer si l'ingénierie peut être influencée par de nouveaux imaginaires liés à la transition écologique.

2.2.3 De l'ingénieur humaniste... à l'ingénierie pour la soutenabilité : quels chemins pour la transition ?

Le rôle de l'ingénieur a évolué au fil des siècles. Les enjeux actuels étant centrés autour de la transition écologique, je fais l'hypothèse que l'ingénieur du XXI^e siècle devrait développer des aspirations, des compétences, des méthodes et artefacts en lien avec cette transition. Cette section va permettre de répondre aux questions suivantes : dans quelle mesure la transition écologique remet-elle en cause le rôle de l'ingénieur ? Quelle transition doit être à l'œuvre chez les ingénieurs pour trouver leur place dans une société vivant à la période Anthropocène ? [Glavič, 2022, p.2] affirme "nous avons besoin de solutions techniques qui n'auront pas d'effets négatifs à long terme sur l'environnement, ce qui rendra la société humaine résiliente et soutenable. De nouvelles approches sont nécessaires qui requièrent (entre autres) un nouveau type d'ingénierie - une approche d'ingénierie soutenable dans la conception et le contrôle des systèmes, des processus et des produits". De nombreuses "sous-catégories" de l'ingénierie en lien avec la soutenabilité ont émergé : l'ingénierie écologique, l'ingénierie environnementale, l'ingénierie soutenable, l'ingénierie verte, etc. Le positionnement de ces différentes catégories d'ingénierie est précisé dans le chapitre 4.

Dans cette section, il s'agit de montrer qu'il existe des caractéristiques permettant l'ingénierie pour la soutenabilité et identifier des facteurs d'évolution pour la transition écologique.

L'objectif ici est d'identifier différents principes constitutifs de l'ingénierie pour la soutenabilité ainsi que des moyens pour initier un changement culturel chez les ingénieurs afin d'intégrer pleinement la soutenabilité dans leurs pratiques. Dans un premier temps, il s'agit d'analyser comment l'ingénierie utilise la technologie comme un outil médiateur entre les organisations humaines et les systèmes naturels. Dans un deuxième temps, il s'agit d'étudier comment les apprentissages, dans les formations d'ingénierie, peuvent conditionner la manière qu'ont les nouveaux ingénieurs de percevoir le monde et d'agir dans ce monde.

Relations entre les systèmes humains - techniques - naturels : au fondement de l'ingénierie pour la soutenabilité

Cette section est dédiée à l'étude du lien entre les systèmes techniques, les organisations humaines et les systèmes dits naturels. Tout au long de leur cycle de vie (début, milieu et fin de vie), les systèmes techniques transforment les espaces naturels, les organisations humaines, les systèmes culturels. Étant donné que l'ingénieur utilise et produit des systèmes techniques, il est crucial qu'il comprenne les interactions entre les aspects techniques, culturels, organisationnels qui sont au cœur de la technologie. [Picon, 2004] affirme que l'ingénieur se voit comme un médiateur entre la nature et les humains : "Je voudrais ici attirer l'attention sur une autre dimension de l'ingénierie, à savoir sa croyance en un ordre naturel qui devrait être une source d'inspiration permanente pour les hommes et leurs organisations. Pour être plus précis, les ingénieurs se sont généralement considérés comme des médiateurs entre la nature et l'homme. Leur tâche était censée rendre la nature exploitable, l'humanisant ainsi dans une certaine mesure, tout en important dans le domaine humain des principes de productivité présents dans le monde naturel" [Picon, 2004, p.431]. Ceci amène à questionner les raisons qui ont poussé les ingénieurs à se voir

de cette manière.

Le terme technologie a été défini précédemment (section 2.2.1). Il s'agit à présent de définir les systèmes humains et les systèmes naturels. Les systèmes humains englobent les individus, les systèmes sociaux (familles, communautés, réseaux, organisations) et les institutions humaines. Les systèmes humains sont composés de plusieurs sous-systèmes entremêlés (système politique, système scientifique, système légal, système médiatique, système pédagogique) (cf figure 2.10). Les systèmes naturels sont composés de systèmes physiques (lithosphère, hydrosphère, atmosphère) et de la biosphère (organismes vivants sur la terre et dans les milieux aquatiques).

[Gagnon et al., 2009, p.14] affirme que "la nature complexe des interactions qui se produisent dans les systèmes physiques et sociaux devrait inciter à une utilisation prudente de la technologie dans les projets d'ingénierie. La compréhension scientifique des systèmes physiques et sociaux étant limitée, les interventions humaines ont presque inévitablement des effets indirects inattendus. En outre, certaines décisions ou actions prises pour résoudre un problème peuvent aggraver la situation à long terme, en raison d'effets rétroactifs indésirables (c'est-à-dire des résultats négatifs résultant de boucles de rétroaction stimulées par l'intervention initiale). Par conséquent, les projets d'ingénierie ne doivent pas être considérés uniquement comme des défis techniques, mais aussi comme des vecteurs de transformation sociale, positive ou négative, agissant parmi de nombreux autres facteurs" [Gagnon et al., 2009]. Ainsi, la technologie impacte à la fois les systèmes humains et les systèmes naturels. Une perspective socio-technique doit être privilégiée dans des activités d'ingénierie pour la soutenabilité.

Dans le contexte de l'Anthropocène, la production de systèmes techniques doit être particulièrement attentive aux impératifs de retours dans un espace "sûr et juste" pour l'humanité, tel que décrit dans la section 2.1.1. Cette vision de l'ingénieur médiateur, devant acquérir une forte maturité dans la compréhension des systèmes naturels et des systèmes humains, est également décrite dans la figure 2.10. L'ingénieur est en prise avec l'anthroposphère (systèmes sociaux) tout en faisant partie de cette sphère qui interagit avec l'écosphère, composée de systèmes physiques et de systèmes naturels.

Conclusion : Un des éléments constitutifs de l'ingénierie soutenable est la capacité de l'ingénieur à comprendre les impacts de ses activités sur les systèmes naturels et les systèmes humains (perspective socio-technique) afin d'ancrer son action dans un paradigme de limites planétaires et de bien-être humain (modèle de société sûr et juste), à plusieurs échelles spatiales (vision systémique) et temporelles (long terme). Ainsi, une réflexivité sur l'acte de conception (technocriticité) est indispensable à la participation de l'ingénierie à une transition écologique.

Des éléments indispensables au développement d'une ingénierie soutenable ont été présentés. Il semble que cette vision n'est pas facilement intégrée dans les pratiques d'ingénierie. Ainsi, l'objectif de la section suivante est d'identifier des possibles portes d'entrée pour inscrire cette vision systémique de l'ingénierie dans les pratiques d'ingénierie contemporaines.

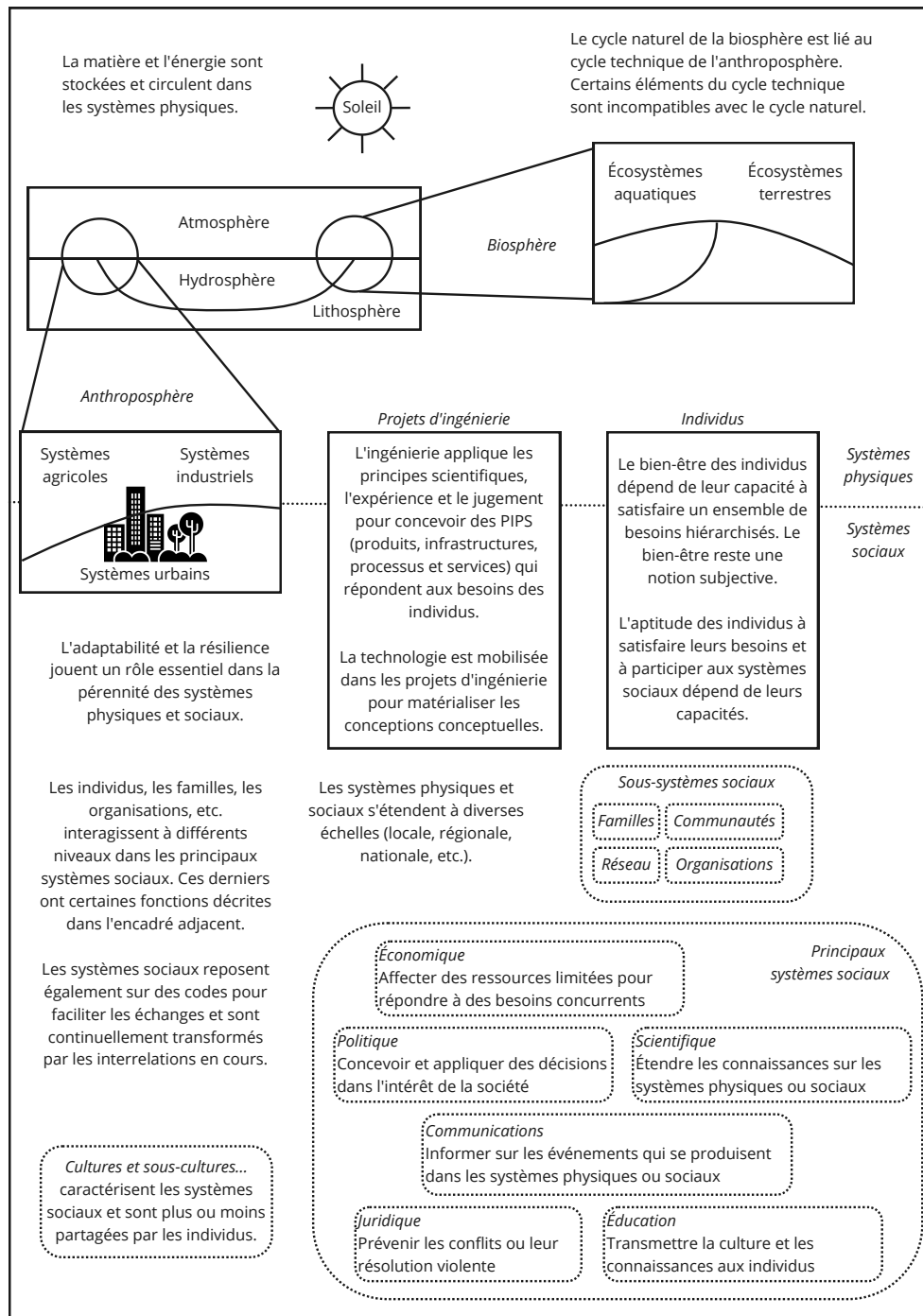


FIGURE 2.10 – Modèle liant ingénierie et soutenabilité, reproduit et traduit de [Gagnon et al., 2009]

Cette figure est structurée en deux parties. La partie haute concerne les systèmes physiques. Ces systèmes sont composés de l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et de la biosphère. L'anthroposphère fait partie à la fois des systèmes naturels et des systèmes sociaux. La partie basse de la figure concerne les systèmes sociaux. Les éléments encadrés en trait continu (*projets d'ingénierie* et *individus*) sont centrés sur les questions d'ingénierie et de bien-être humains. Les éléments en encadrés pointillés constituent des sous-systèmes sociaux et leur description. Les éléments sans encadrés sont des commentaires généraux sur les systèmes sociaux et physiques (leurs relations notamment).

Quels points d'entrée pour une transition vers l'ingénierie pour la soutenabilité ?

Dans les sections précédentes, l'évolution de l'ingénierie au fil des siècles et des zones géographiques a été décrite. Cette évolution a été initiée par des changements dans les représentations que les acteurs se font du monde qui les entoure. Notre vision du monde, nos systèmes de valeurs influencent la manière dont nous comprenons et agissons dans le monde réel. Cette description est proche du modèle imbriqué de [Sterling, 2010], modèle représenté dans la figure 2.11.

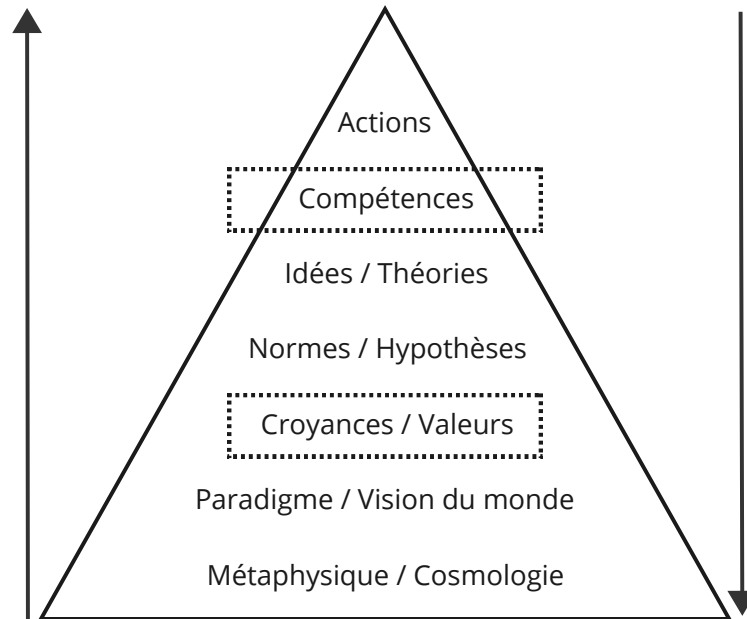


FIGURE 2.11 – Système imbriqué de connaissances, reproduit et traduit de [Sterling, 2010] et [Biberhofer et al., 2019]

Cette figure représente le système imbriqué proposé par [Sterling, 2010] auquel [Biberhofer et al., 2019] ajoute les compétences. Cet ajout s'explique par le fait que les compétences jouent un rôle majeur dans la mise en oeuvre d'actions par les parties prenantes. Le système imbriqué est composé de sept niveaux (actions, compétences, idées / théories, normes / hypothèses, croyances / valeurs, paradigme / vision du monde, métaphysique / cosmologie) et se lit dans les deux sens (de haut en bas et de bas en haut).

Dans la figure 2.11, le schéma montre différents niveaux de connaissances. Les compétences et les croyances / valeurs sont encadrées car ce sont les deux éléments sur lesquels je centrerai mes expérimentations et analyses (chapitres 5 et 7). Ce modèle fonctionne dans les deux sens, c'est-à-dire que la cosmologie va jusqu'à influencer les actions et inversement. Selon Sterling, il existe plusieurs niveaux d'apprentissage (niveaux d'intégration des apprentissages chez un individu ou chez un groupe d'individus). Ainsi, l'acte d'apprendre peut impacter plusieurs niveaux de conscience. Sterling appelle cela un "système imbriqué". Selon lui, "les perceptions et les conceptions plus profondes informent, influencent et aident à manifester des idées plus immédiates qui, à leur tour, affectent les pensées et les actions plus quotidiennes" [Sterling, 2010, p.21]

Ainsi, les différents niveaux du modèle de Sterling apparaissent comme des portes

d'entrée pour influencer les actions (pour nous les pratiques d'ingénierie). C'est la raison pour laquelle ce travail de thèse va se focaliser sur certains des éléments du modèle de Sterling, notamment les compétences et les valeurs. Ces deux "portes d'entrée" ont été choisies car il existe des méthodes robustes d'analyse des valeurs et des compétences pour comprendre l'impact d'une technique sur les acteurs à son contact.

Une valeur est comprise dans le même sens que dans la méthodologie *Value sensitive design*, c'est-à-dire que les valeurs humaines désignent ce qui est important pour les acteurs dans leur vie (leur famille, l'éducation, la liberté, prendre soin de soi ou des autres, la science, etc) [Friedman et al., 2008].

Une compétence est une capacité à agir dans un milieu complexe. Une compétence peut s'acquérir tout au long de la formation ainsi que dans la pratique métier. Afin d'assurer certains éléments constitutifs de l'ingénierie soutenable chez les praticiens de l'ingénierie, il est donc nécessaire de présenter ces éléments dans les parcours de formation.

L'ingénierie est une activité interdisciplinaire faisant usage d'artefacts physiques et numériques. Ces artefacts sont porteurs de connaissances et véhiculent ainsi des savoirs, des informations, à l'ensemble des parties prenantes d'un projet d'ingénierie. Ainsi, l'artefact, l'information et la connaissance sont intimement liés [Boujut and Blanco, 2003]. C'est la raison pour laquelle l'importance des artefacts en ingénierie pour la soutenabilité est étudiée dans le prochain chapitre.

Conclusion : Les compétences et actions des ingénieurs sont en lien avec les valeurs, la vision du monde et la cosmologie qu'ils portent. Cela participe à définir leur manière d'agir dans le monde. Ainsi, les compétences des ingénieurs du XIXe siècle sont différentes de celles des ingénieurs du XXIe siècle car leur monde est différent, leur vision du monde l'est également, tout autant que leurs valeurs, leurs normes sociales, leurs compétences et les actions qu'ils et elles peuvent mener. L'ingénierie est une activité où de nombreux artefacts porteurs d'information et de connaissances sont échangés entre les acteurs.

2.3 Conclusion du chapitre 2

La transition écologique correspond à une transition profonde des fonctions sociales des sociétés occidentales pour que l'impact des activités humaines revienne en dessous des seuils des limites planétaires et au-delà d'un plancher social. Cette transition oblige à repenser les systèmes techniques. C'est la raison pour laquelle les acteurs qui produisent des techniques et qui pensent la technologie sont au coeur de cette thèse. Le choix s'est porté sur l'ingénierie car cette activité est directement liée aux activités de production de technologies. Il a été montré que les activités d'ingénierie ont évolué en fonction des contextes historiques, politiques et sociaux. Ainsi, la technologie, comprise dans un sens large, est porteuse d'éléments techniques, organisationnels et culturels. Étant donné le changement fondamental que requiert la transition écologique, l'hypothèse faite est que cette transition écologique va impacter l'ingénierie. Ainsi, c'est l'ingénierie en tant que discipline (niveau collectif) ainsi que ses acteurs (niveau individuel) qui sont touchés par la transition écologique.

Un autre phénomène a transformé l'ingénierie : la transformation numérique. Ce sujet est spécifiquement abordé dans le chapitre suivant. Les artefacts numériques et l'infor-

matique de manière générale sont aujourd’hui dans le quotidien de pratiques d’ingénierie. Dans un contexte de nécessaire transition écologique, il est important de mieux comprendre quel est le rôle de l’informatique dans l’évolution des pratiques d’ingénierie.

Dans les activités d’ingénierie, les artefacts (physiques et numériques) sont utilisés et véhiculent des connaissances, des représentations. Ces représentations peuvent jouer un rôle dans le monde interprété et attendu des ingénieurs et concepteurs et donc influencer les prises de décision pour la conception soutenable [Bratec, 2020]. Il s’agit de comprendre le rôle que peuvent jouer les artefacts numériques dans l’ingénierie pour la soutenabilité des systèmes socio-techniques. Cette étude est l’objet du chapitre 3 et permet d’analyser dans quelle mesure des interactions avec des artefacts d’ingénierie peuvent avoir des impacts individuels et/ou collectifs sur l’ingénierie pour la soutenabilité.

Étude des artefacts numériques d'ingénierie pour la transition écologique : analyse des adéquations culturelles

Efforts to radically transform society will be useless unless we fundamentally redesign the artifacts through which it is reproduced.

[Hornborg, 2019, p.13]

Comme défini dans le chapitre 2, la transition écologique a pour objectif d'accompagner les sociétés contemporaines afin de revenir dans un espace environnementalement sûr et socialement juste pour l'humanité. La transition écologique vient donc remettre en cause la dynamique de consommation propre aux sociétés occidentales et est une transition culturelle. Le chapitre précédent a permis de montrer que l'ingénierie est influencée par cette transition écologique, étant donné le caractère poreux et rationnel de l'ingénierie. Les caractéristiques de l'ingénierie pour la soutenabilité ont été détaillées dans le chapitre précédent, un type d'ingénierie qui pourrait avoir sa place dans la transition écologique. Les pratiques d'ingénierie sont par nature collectives, collaboratives et font appel à de multiples artefacts.

À travers une analyse de l'état de l'art, ce chapitre va permettre d'identifier le rôle des artefacts et notamment des artefacts numériques dans les dynamiques collectives d'ingénierie. Il s'agira donc de montrer que les artefacts dans les processus d'ingénierie jouent un rôle dans les projets collectifs et qu'ils sont vecteurs d'informations, de représentations, de valeurs. Les valeurs sont des conceptions fondamentales de ce qui est désirable pour les individus et la société. Elles servent de normes ou critères pour guider non seulement l'action, mais aussi le jugement, l'argumentation, l'évaluation et le choix [Williams Jr, 1979]. Ce chapitre est l'occasion de questionner le positionnement de ces valeurs par rapport à celles portées par la transition écologique.

L'objectif de ce chapitre est de mieux comprendre le rôle des artefacts techniques dans l'évolution de la pratique d'ingénierie et en particulier pour accompagner la transition écologique. Il s'agit bien d'étudier les outils informatiques des ingénieurs pour la

soutenabilité.

Ce questionnement se positionne à l'intersection entre les travaux des communautés scientifiques de l'ingénierie de la conception et de la production, de l'informatique et de l'interaction humain-machine. Ce chapitre va se structurer en trois sections. La première section a pour objectif de comprendre si la transformation numérique, et donc les outils numériques, ont un rôle à jouer dans la transition écologique (section 3.1). La deuxième section a pour objectif de positionner mes questionnements - sur les valeurs et la culture en lien avec les artefacts - dans les différentes communautés scientifiques en lien avec nos travaux : l'ingénierie de la conception et l'informatique (section 3.2). La troisième section présentera le positionnement scientifique, les hypothèses, la question de recherche et la proposition qui sera testée (section 3.3).

3.1 Analyse du rôle du numérique dans la transition écologique

La transition écologique remet en question les modes de vie contemporains, notamment les modes de vie des sociétés occidentales. Un autre phénomène, le développement des outils informatiques, est apparu dans la seconde moitié du XXe siècle. Le terme de "transformation numérique" est utilisé pour décrire le phénomène d'adoption de techniques numériques au sein de la société [Vial, 2019]. Ce phénomène est défini de multiples manières. En effet, dans le Tableau 1 de [Vial, 2019], l'auteur liste 23 définitions de la transformation numérique dans la littérature scientifique, dans le périmètre des recherches sur le management et la stratégie autour des systèmes d'information. Il s'avère que plusieurs éléments sont récurrents dans ces définitions, notamment : l'insertion de technologies numériques en vue d'acquérir une plus grande performance pour l'entreprise (une amélioration du business model), l'importance de la donnée comme outil d'analyse stratégique, une manière d'améliorer l'efficacité des processus des entreprises (fonctions supports, chaînes de production, etc.). Ainsi la transformation numérique semble liée à une dynamique économique capitaliste. La transformation numérique est précisée dans la section 3.1.1 en définissant dans un premier temps les termes mobilisés (information, informatique, numérique). Puis, sur la base d'une analyse de l'état de l'art, le rôle de la transformation numérique et de la culture numérique dans la transition écologique est étudié. La section 3.1.2 est centrée sur la manière dont les artefacts numériques sont porteurs de valeurs et comment ces artefacts peuvent être en adéquation avec les valeurs portées par la transition écologique.

3.1.1 Transformation numérique : périmètre et impact sur la transition écologique

Cette section est dédiée à la caractérisation de ce qu'est le numérique et la transformation numérique, ainsi qu'à l'identification du rôle du numérique dans la transition écologique. Ainsi, il s'agira dans une première sous-partie de préciser ce que signifie le terme "numérique" et de le différencier d'autres termes tels que l'informatique ou l'information. Dans une deuxième sous-partie, il s'agit d'identifier comment transformation numérique et transition écologiques se croisent (ou se loupent !). Il a été choisi de clôturer

cette section sur le questionnement de l'intérêt de la transition numérique et le rôle des outils informatiques individuels et collectifs dans les évolutions de société.

Définition des termes information, informatique et numérique

Le terme "information" va être défini car l'information est un élément véhiculé par les artefacts informatiques et numériques. Ces deux derniers termes (informatique et numérique) sont également définis, ainsi que les cultures qui les accompagnent. L'objectif de cette section est de positionner ces trois concepts les uns par rapport aux autres.

Information

Le terme "information" est important à définir car les outils informatiques et numériques transmettent, automatisent, synthétisent, manipulent des "informations". Le terme information vient du latin "informare" qui signifie "donner forme à" ou "se former une idée de". Selon [Legrenzi, 2015], le terme information est accompagné de plusieurs controverses, notamment sur :

- La définition de l'information : l'information est basée sur les données traitées selon certains comme [Frické, 2009, Rowley, 2007], tandis qu'elle est un ensemble de connaissances explicitées pour d'autres ou encore l'application de la connaissance à la donnée selon [Kettinger and Li, 2010]. Certains auteurs se refusent même de donner une définition à ce concept [Frohmann, 2004, Nunberg, 2002]. Il est donc difficile de définir ce qu'est l'information ;
- Le lien entre information et sens : ce lien existe pour certains où l'information apporte une connaissance menant à une certaine forme de sagesse [Ackoff, 1989] tandis que pour d'autres l'information est objective, abstraite et doit être comparée à des objets physiques [Mingers, 1995].

Étant donné que le terme information est difficile à délimiter, une définition large a été choisie. L'information est comprise comme une représentation d'éléments, de contenus et la manière dont ces contenus sont représentés. L'information véhicule des connaissances dans un contexte particulier. Ainsi, le sens de l'information est dépendant de la personne qui la reçoit et du contexte.

Parmi les informations, il y a des informations représentées sous forme numérique (0 ou 1). Ces informations numériques sont les éléments de base manipulés par les outils informatiques.

Informatique

Le mot "informatique" vient de l'allemand *Informatik* utilisé pour la première fois en 1957 par Karl Steinbuch [Legrenzi, 2015]. Sa traduction française a été créée en 1962 par Philippe Dreyfus. L'informatique est définie par la science du traitement automatique de l'information. Les objets informatiques sont composés d'éléments matériels et d'éléments logiciels. Selon [Drot-Delange and Bruillard, 2012], il existe une culture informatique caractérisée par une volonté d'émancipation. Son analyse se base sur de nombreuses études sociologiques qui ont étudié les groupes de hackers, c'est-à-dire de personnes passionnées par les ordinateurs. La culture informatique semble être ancrée dans une culture militante où la maîtrise de son environnement technique est nécessaire pour agir. En effet, cette maîtrise technique confère du pouvoir d'agir au sein des organisations. Cette culture est toujours présente et préexiste à la culture du numérique, présentée dans la prochaine section.

Numérique

Le terme "numérique" a tendance à être utilisé au même titre que "informatique", floutant ainsi les périmètres des définitions entre ces deux termes. Pourtant sa signification est sensiblement différente. Le terme numérique vient du latin numerus et signifie "nombre". L'adjectif "numérique" désigne une "suite de caractères et de nombres qui constituent une représentation discrète d'un objet". Cependant, numérique prend un autre sens quand il est pris en tant que substantif : le numérique. [Moatti, 2012] affirme même que le numérique est personnifié. Il est très difficile de trouver une définition du terme "numérique" quand celui-ci est compris comme un synonyme d'informatique. C'est la raison pour laquelle la suite de cette section est davantage centrée sur la définition de la culture du numérique pour comprendre ce terme.

[Drot-Delange and Bruillard, 2012] définit la culture du numérique comme une manière de donner du pouvoir aux utilisateurs. En effet, "cet avènement des cultures numériques permettrait à l'informatique, selon [Denouël and Granjon, 2011], de gagner d'autres sphères, telles les sphères médiatiques et culturelles, grâce à une moindre technicité nécessaire. Cette simplification, via la micro-informatique puis le développement du web, aurait permis à d'autres personnes que les amateurs d'informatique de s'emparer de ces technologies. Ce serait donc ainsi la démocratisation d'une informatique 'sans le savoir'" [Drot-Delange and Bruillard, 2012]. Également, [Deuze, 2006] affirme que la culture dominante du XIXe siècle était autour de l'impression, celle du XXe siècle autour de l'électronique et celle du XXIe siècle est celle du numérique.

Finalement, l'ère du numérique correspond à une période où l'ensemble des aspects du quotidien des sociétés modernes est lié d'une certaine manière à une forme d'informatisation.

Le terme numérique désigne sous un même terme des réalités très différentes, comme l'explique [Roussilhe, 2021]. Dans cette thèse, il a été choisi de se focaliser sur des outils numériques utilisés dans des contextes d'ingénierie pour la soutenabilité. En effet, il s'agit de s'intéresser aux technologies informatisées qui ont pour objectif d'accompagner un processus d'ingénierie, avec une focalisation sur l'usage de cette technologie (et non le fonctionnement de cette technologie d'un point de vue technique). Les parties prenantes impliquées dans les expérimentations ne seront pas des experts informatiques mais plutôt des amateurs qui s'emparent des technologies numériques.

Conclusion : Ces trois concepts - information, informatique et numériques - sont difficiles à définir en termes de périmètres et s'appuient les uns sur les autres. L'approche par les cultures portées par ces technologies permet de positionner mon étude autour des artefacts numériques d'ingénierie.

Dans la prochaine section, il s'agit d'étudier si transformation numérique et transition écologique peuvent se rencontrer.

Caractéristiques de la transformation numérique en lien avec la transition écologique

L'intégration d'artefacts numériques dans les processus industriels, entrepreneuriaux et dans la sphère privée des citoyens a augmenté l'impact écologique du numérique ces dernières décennies. Dans cette section, les différents impacts écologiques des artefacts

numériques sont explorés à partir d'une analyse de l'état de l'art. L'objectif est de disposer des informations pour identifier les caractéristiques pertinentes issues du monde numérique pour la transition écologique. Ces informations permettent finalement de s'interroger sur la pertinence de l'usage d'artefacts numériques pour l'accompagnement de pratiques d'ingénierie pour la soutenabilité.

Numérique et écologie : des dynamiques antinomiques

La transformation numérique, selon [Monnoyer-Smith, 2017], "résulte (...) d'innovations techniques, dont l'une des conséquences essentielles est de fonder la création de la valeur davantage sur la production et sur l'analyse des données que sur la production de biens et de services". Plusieurs études ont permis de structurer les impacts environnementaux des technologies de l'information et de la communication (TIC). Il est possible d'affirmer que les technologies de l'information et de la communication ont des impacts multi-échelles et décrire 3 niveaux d'impacts [Berkhout and Hertin, 2004, Hilty and Aebischer, 2015]. Le premier niveau (1er ordre) concerne la matérialité des TIC, ce sont les impacts dits directs qui ont lieu sur l'ensemble du cycle de vie du produit (extraction de matières, fabrication, fin de vie). Un deuxième niveau (2e ordre) concerne les impacts capacitants (aussi appelés impacts indirects), c'est-à-dire les activités rendues possibles par l'usage des technologies. En effet, ces activités sont émettrices d'impacts environnementaux ou peuvent potentiellement en éviter. Ces impacts sont souvent identifiés comme positifs par la littérature grise. Cependant, ces études se basent sur des hypothèses largement optimistes et peu crédibles [Roussilhe, 2021]. Un troisième niveau (3e ordre) concerne les impacts structurants, c'est-à-dire les impacts touchant les comportements collectifs et les structures de la société. La figure 3.1 reprend les différents niveaux décrits par [Berkhout and Hertin, 2004, Hilty and Aebischer, 2015].

La multiplication des objets informatiques (via l'IoT, la domotique, etc.) engendre une augmentation de l'impact environnemental du secteur du numérique (extraction de matière, énergie, gestion de la fin de vie) [Ferreboeuf et al., 2019, p.20-23]. De plus, cette multiplication a été utilisée au service d'une forme de performance des entreprises pour augmenter la production de biens et services (optimisation des chaînes de production).

Un des problèmes de cette structuration est la séparation des éléments positifs et négatifs. En effet, les deux colonnes sont séparées alors que les effets d'optimisation (colonne "Les TIC comme partie de la solution") inscrits dans une dynamique économique guidée par la croissance entraîne des effets rebonds (colonne "les TIC comme partie du problème"). Par exemple, la mise en place d'une plateforme d'économie collaborative pour l'échange d'objets ou la vente d'objets de seconde main ne se substitue pas à l'achat d'objets neufs [Demailly et al., 2016]. L'économie collaborative basée sur des logiciels ne remplace pas l'achat de biens neufs mais va s'y ajouter. Donc, une économie en réseau (effet positif de 3e ordre) vient produire un effet d'induction (effet négatif de 2e ordre) et non un effet de substitution (effet positif de 2e ordre). Cette séparation des aspects "positifs" et "négatifs" cache les relations entre les deux colonnes centrales de la structuration. Lorenz Hilty et ses collègues ont produit d'autres modèles et ont retiré les colonnes "positives" et "négatives". Par contre, les niveaux (cycle de vie pour le niveau 1, *enabling impact* pour le niveau 2 et *structuring impact* pour le niveau 3) ne changent pas dans les futurs modèles.

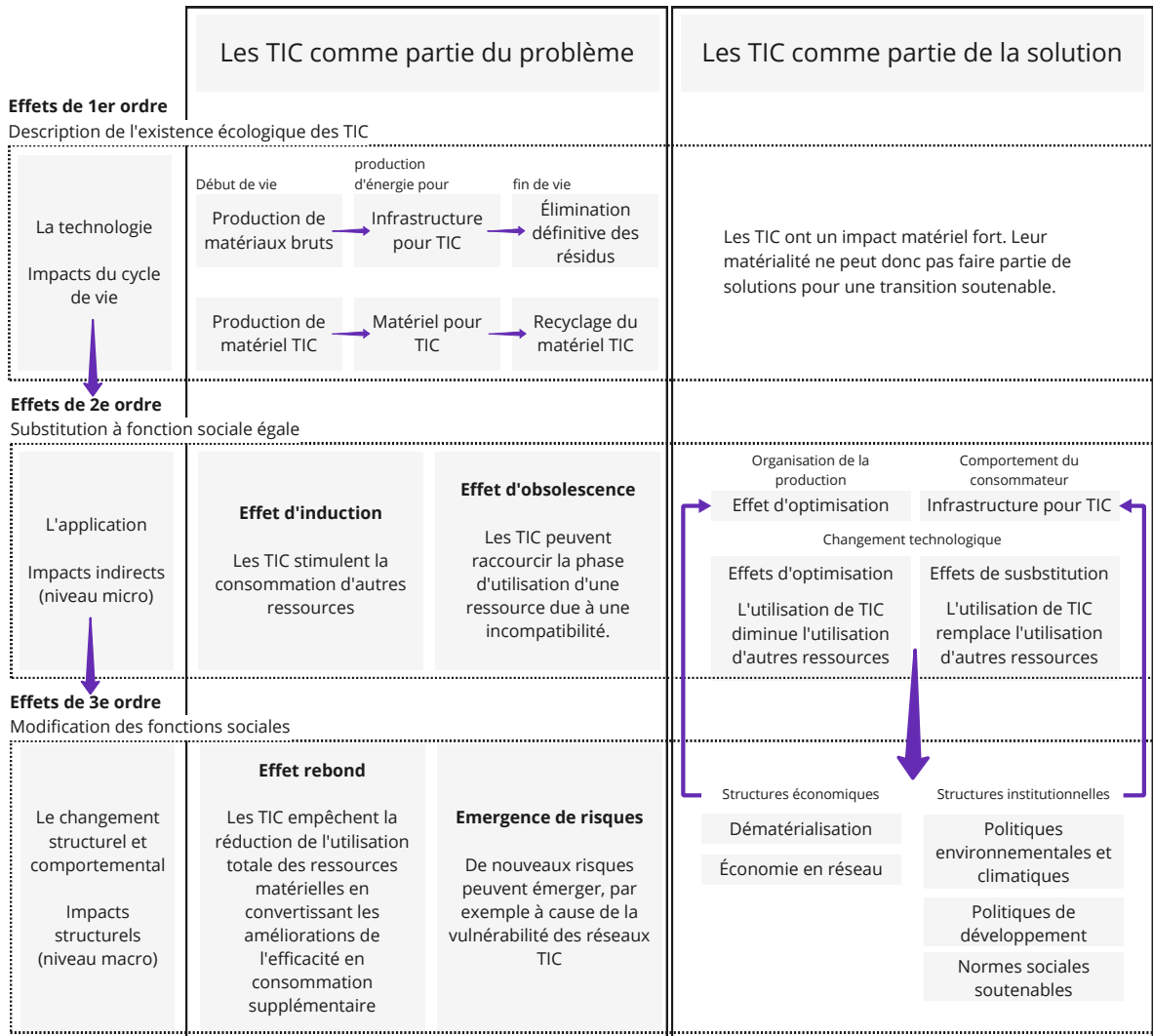


FIGURE 3.1 – Représentation des effets de 1er, 2e et 3e ordre des technologies de l'information et de la communication, adapté et traduit de [Berkhout and Hertin, 2004, Hilty and Aebischer, 2015]

Cette figure est structurée en trois niveaux : effets de 1er ordre, 2e et 3e ordre. Chaque niveau est composé de deux parties : les éléments "négatifs" des TIC (à gauche du diagramme) et les éléments plutôt "positifs" (à droite du diagramme). Je présente ce diagramme car il représente le début de la réflexion scientifique autour de la structuration des impacts environnementaux de l'informatique. Dans un travail que j'ai réalisé pour comprendre comment évaluer les projets informatiques par rapport aux questions de soutenabilité, je montre que cette structuration porte certaines limites, [Grimal et al., 2021a].

Une culture numérique qui peut entraîner des points de rencontre avec la transition écologique

Dans son analyse du rôle de la transformation numérique dans la transition écologique, [Monnoyer-Smith, 2017] utilise les trois caractéristiques d'une culture numérique mondiale émergente définies par [Deuze, 2006]. Ces caractéristiques sont décrites à partir d'une analyse de la littérature sur les défis posés par le journalisme en ligne, la prolifération des initiatives de publication ouverte, la popularité de récits individualisés en ligne (podcast, weblogs) et sont les suivantes :

- La participation : la création de sens, la création de valeur par un engagement actif des acteurs ;
- La remédiation : le maintien des potentialités des anciens médias (journaux) avant de passer à de nouvelles potentialités (nouvelle sémiotique, c'est-à-dire nouvelle manière de créer du sens). La compréhension de la réalité peut être modifiée, manipulée, réformée ;
- Le bricolage : l'assemblage, de manière réflexive, de versions particulières de la réalité, permettant un mélange de contenus divers.

Ces trois caractéristiques peuvent être une force pour la transition écologique dans le sens où elles transforment des pratiques, conditionnent des usages. Par exemple, la caractéristique "participation" décrit la possibilité pour les usagers de participer à des prises de décisions, à questionner des monopoles. [Monnoyer-Smith, 2017] affirme que les trois caractéristiques définies par [Deuze, 2006] s'expriment dans les modes de transports partagés : "les trois logiques de bricolage, de remédiation et de participation s'expriment dans l'invention des nouvelles formes de transports partagées, qui tendent à inventer un nouveau modèle d'autonomie "connectée" au sein d'un réseau social plus large".

La culture d'autonomisation des usagers est particulièrement intéressante pour la transition écologique. En effet, cette volonté d'autonomisation permet aux acteurs de questionner leur environnement, via une appropriation des artefacts. Cela rejoint la caractéristique de la "participation" dans le sens où les usagers peuvent prendre part au contrôle de certains processus. Au niveau individuel, ce contrôle peut prendre la forme d'un contrôle de sa consommation d'énergie, un suivi de ses activités quotidiennes. Au niveau collectif, ce contrôle / suivi peut être mis en réseau et des stratégies collectives peuvent émerger.

Conclusion : L'usage des outils numériques entraîne des impacts (directs et effets rebonds) à différents niveaux de la société. La transformation numérique pose des difficultés à la transition écologique en augmentant les impacts de la société aux niveaux matériel, énergétique et participe à des impacts structurants en soutenant des structures économiques actuelles. Cependant, certains éléments de la culture numérique, notamment la participation et le bricolage, peuvent être bénéfiques à la transition écologique.

La prochaine section a pour objectif d'analyser le lien entre les artefacts numériques utilisés dans un contexte et les valeurs portées dans ce contexte. Cela permettra de comprendre dans quelle mesure un alignement est nécessaire entre les valeurs culturelles d'un contexte et les valeurs liées aux artefacts.

3.1.2 Étude de l'alignement entre les valeurs véhiculées par les artefacts et leurs caractéristiques techniques

La section précédente a permis de voir que des artefacts numériques sont reliés à des contextes structurels (effets de 3e ordre) c'est-à-dire à des niveaux collectifs et non seulement individuels. Cette section a pour objectif de relier les notions techniques avec les valeurs individuelles et collectives des usagers.

Dans la première section, un cadre conceptuel permettant de créer un lien entre les artefacts numériques et la culture d'une communauté est présenté. Ce cadre conceptuel n'est pas le coeur de la proposition de la thèse mais plutôt une hypothèse forte sur laquelle je base mon travail. En effet, ce cadre conceptuel permet de justifier l'analyse par les interactions humains-technologie réalisée dans mes travaux. La deuxième section est focalisée sur un cas d'étude permettant d'explicitier les liens entre les différents niveaux du cadre conceptuel. La troisième section permet d'interroger le besoin d'un alignement entre les valeurs portées par les artefacts (dans leur conception et dans leur interaction avec leur usager) et les valeurs portées par les communautés dans lesquelles ils sont utilisés. Sur la base de cette analyse, le chapitre conclut sur les hypothèses principales de la thèse et la proposition défendue.

Niveaux de la perma-circularité : cadre conceptuel

Dans le chapitre précédent, il a été présenté une structuration d'indicateurs de la perma-circularité. Cette structuration est présentée dans le tableau 2.1 et reprend trois niveaux d'indicateurs :

- Indicateurs culturels dits indicateurs de "haut" niveau ;
- Indicateurs management dits indicateurs de "milieu" niveau ;
- Indicateurs opérationnels dits indicateurs de "bas" niveau.

Les indicateurs opérationnels sont au niveau des sites industriels ou d'activités industrielles. Dans mon étude, je m'intéresse aux artefacts. Ces artefacts sont à un niveau plus bas encore que les sites industriels. Ainsi, un niveau a été ajouté à cette structuration, le "niveau d'interaction". Cette catégorie d'indicateurs définit les interactions entre les acteurs et les artefacts. Dans mes travaux, notamment dans [Grimal et al., 2023a], j'ai montré que les interactions constituent un sujet important car il permet de véhiculer des valeurs individuelles et collectives.

L'ensemble de cette structuration est visible dans le tableau 3.1. Cette thèse n'est pas le lieu pour définir précisément les différents indicateurs (culturels, managériaux, opérationnels, interactionnels). Cependant, cette structuration permet de comprendre que les niveaux les plus bas sont reliés aux niveaux les plus hauts (interdépendance des niveaux). Ainsi, le niveau de l'interaction humain-machine est une porte d'entrée pour comprendre le système culturel embarqué dans les systèmes techniques.

Baser des travaux de recherche sur cette structuration en 4 niveaux permet d'identifier les liens potentiels entre le niveau culturel et le niveau de l'artefact, en passant par des niveaux intermédiaires. Ainsi, cela permettrait de comprendre les liens entre le niveau de l'artefact et les niveaux plus structurants de la société. L'hypothèse faite est que cette structuration en 4 niveaux permettrait d'accompagner la conception d'artefacts davantage en phase avec les valeurs nécessaires au développement de la transition écologique.

TABLE 3.1 – Nouvelle structuration des indicateurs de la perma-circularité, adapté de [Arnsperger and Bourg, 2016] avec l’ajout du niveau interactionnel

Nom des niveaux	Caractéristiques des niveaux
Niveau culturel	"Au niveau national ou au niveau de la structure de la production"
Niveau managérial	"Au niveau du territoire ou d’un espace d’activité"
Niveau opérationnel	"Au niveau des activités autour du produit, de l’entreprise"
Niveau interactionnel	"Au niveau de l’interaction entre le praticien et l’artefact"

Avant de définir plus précisément la méthodologie scientifique envisagée pour tester cette proposition, il convient de mettre à l’épreuve ce cas d’étude théorique à travers un exemple, celui du Product Lifecycle Management (PLM). C’est ce qui est présenté dans la section suivante.

Niveaux de la perma-circularité : analyse rétrospective sur le cas d’étude du PLM

Dans cette section, j’ai choisi de tester théoriquement ma proposition de structuration à 4 niveaux en prenant comme exemple un outil informatique qui implémente une approche intégrative du "cycle de vie" : le Product Lifecycle Management (PLM). Le choix d’outils numériques en support de l’approche Product Lifecycle Management (PLM) a été fait car particulièrement bien documenté.

Le PLM est une approche stratégique d’intégration au sein d’une filière économique. Il s’appuie sur une gestion des connaissances et ressources humaines d’une part et sur une infrastructure numérique d’autre part. C’est cette dernière qui est détaillée par la suite.

Le PLM consiste, de façon synthétique, en un système de gestion de l’ensemble des informations qui sont créées tout au long de la gestion du cycle de vie du produit au sein de la filière économique considérée. Des outils de gestion des données numériques permettent de documenter l’ensemble du cycle de vie du produit de façon collaborative. Les "Product Data Management" (PDM) en support des processus de développements collaboratifs de produit et les Enterprise Resource Planning (ERP) sont des systèmes d’information permettant l’intégration des activités des nombreux acteurs intervenants dans le cycle de vie du produit autour d’une nomenclature de référence unique et partagée (backbone).

J’ai sélectionné une dizaine d’articles sur le PLM analysant les liens entre :

- L’outil informatique supportant l’approche PLM et les utilisateurs de l’outil ;
- L’outil informatique supportant l’approche PLM et l’organisation des processus de conception ;
- L’outil informatique supportant l’approche PLM et les valeurs des entreprises utilisant cet outil.

Une revue de littérature intégrative a été utilisée pour compléter le tableau 2.1, la proposition de structuration en 4 niveaux de l’analyse des interactions entre valeurs individuelles et collectives. Une revue de littérature intégrative est une forme revue de

littérature adéquate pour adresser différentes thématiques dont des nouveaux champs d'étude ou de nouvelles propositions, comme c'est le cas ici (thématiques avec faible niveau de maturité). L'objectif d'une revue de littérature intégrative est décrit par [Torraco, 2005] de la manière suivante : "que l'analyse documentaire porte sur un sujet mature ou émergent, les lecteurs s'attendent à ce que les connaissances issues de la littérature soient synthétisées dans un modèle ou un cadre conceptuel qui offre une nouvelle perspective". Cette description correspond à mon objectif puisque que je souhaite vérifier dans quelle mesure la littérature existante s'intègre au modèle en 4 niveaux. Ainsi, une revue de littérature intégrative a pour objectif de critiquer une littérature existante et de proposer de nouvelles connaissances, de nouveaux modèles, sous la forme d'une synthèse (synthèse qui prendra la forme du Tableau 3.2).

Il s'agit d'une analyse menée par une personne. Il ne s'agit donc pas d'une validation scientifique mais bien d'une mise à l'épreuve test plutôt illustrative avant d'entrer dans une démarche scientifique plus lourde.

Table 3.2: Descriptions des différents impacts du PLM aux niveaux culturel, managérial, opérationnel et au niveau de l'interaction humain-machine

Niveaux	Éléments relevés
Niveau culturel (indicateurs en "haut" de la chaîne d'analyse)	<p>Création d'un environnement de connaissances centré sur le produit avec une mise en relation des acteurs et organisations sur l'ensemble de la chaîne de valeur du produit (collaboration). Cela implique d'intégrer les informations autour des personnes, processus, ressources dans un même système ("<i>Le PLM intègre une vision centrée sur le produit, rendue possible par l'adoption de solutions TIC avancées favorisant la collaboration entre de nombreux acteurs et organisations. L'adoption d'une approche PLM implique, dans un premier temps, de comprendre le rôle de l'information au sein de l'entreprise étendue tout au long de la chaîne de création de valeur.</i>" et "<i>La gestion du cycle de vie des produits (PLM) peut être considérée comme la manifestation de l'ère de l'information du modèle du cordonnier, qui concentre une entreprise sur sa chaîne de valeur et cherche à réintégrer les personnes, les processus, les ressources et les informations.</i>") [Terzi et al., 2010].</p> <p>L'importance de l'informatique et de la donnée : les connaissances sont centralisées afin d'obtenir une vision globale autour des activités. Des systèmes de remontée de données sont implémentés le long des chaînes de production (connectivité des connaissances) ("<i>philosophie de la connectivité des connaissances et cherche à fournir la bonne information au bon moment et dans le bon contexte.</i>" et "<i>Actuellement, l'acronyme PLM joue un rôle "holistique", en rassemblant les produits, les services, les activités, les processus, les personnes, les compétences, les systèmes TIC, les données, les connaissances, les techniques, les pratiques, les procédures et les normes.</i>" et "<i>les données relatives aux produits sont partagées entre les acteurs, les processus et les organisations au cours des différentes phases du cycle de vie du produit afin d'obtenir les performances et la durabilité souhaitées pour le produit et les services connexes.</i>" [Terzi et al., 2010]).</p> <p>La pensée en cycle de vie (avec une attention particulière portée sur la phase de production) se développe. Le PLM sert alors de système de service support où les acteurs renseignent leurs activités routinières "<i>The MOL phase deals with the 'real life' of the product, when it is in the customer's hands, while EOL deals with its 'death'. During these phases, many actors interact with the product : logistic service suppliers, customers, after sales service suppliers, recycling service providers, etc. All these actors perform their repetitive activities, however, at present, they do not exchange much information with other actors. During MOL and EOL phases, PLM is primarily a service support system [...] and can be interpreted as a system of systems.</i>" [Terzi et al., 2010].</p>

Continued on next page

Chapitre 3. Étude des artefacts numériques d'ingénierie pour la transition écologique : analyse des adéquations culturelles

Table 3.2: Descriptions des différents impacts du PLM aux niveaux culturel, managérial, opérationnel et au niveau de l'interaction humain-machine (Continued)

Niveaux	Éléments relevés
Niveau management (indicateurs au niveau "milieu" de la chaîne d'analyse)	<p>Contexte socio-économique. La compétitivité est la raison poussant les entreprises à optimiser leur chaîne de valeur, réduisant ainsi les cycles de développement des produits, donc les coûts. La question de la performance (économique) est au cœur du modèle PLM. Cette performance passe par la représentation de la complexité des processus industriels en unités d'opérations simples dans l'approche PLM. En effet, une chaîne de valeur comporte plusieurs acteurs, sites industriels, organisations, compétences, etc. Il est donc difficile d'assurer la cohérence de cette chaîne de valeur. La fragmentation des processus proposée par l'approche PLM permet une simplification de cette complexité. <i>Pour les phases de conception et de fabrication, la réduction à des opérations unitaires simples a donné naissance au paradigme de la production de masse. Ce paradigme, qui existe encore aujourd'hui, est efficace pour produire de grandes quantités de produits dans des usines automatisées et semi-automatisées. Cependant, ce paradigme a également entraîné une fragmentation des connaissances sur les produits et les processus et a conduit à la situation de silos de connaissances, typique du monde des entreprises d'aujourd'hui.</i>) [Terzi et al., 2010].</p> <p>Attrait de l'informatique. Le PLM s'est développé en même temps que l'informatique s'est développée dans les industries, permettant à l'approche PLM d'être médiatisée dans des outils informatiques de distribution de la connaissance (<i>"Le PLM est un type de système d'information d'entreprise, et le déploiement de systèmes d'information à grande échelle est actuellement une tendance majeure des entreprises, sous l'impulsion de forces telles que le développement d'Internet, la mondialisation et l'utilisation de l'informatique pour la gestion et l'accès aux connaissances distribuées [Braa and Rolland, 2000]"</i>) [Kung et al., 2015].</p>
Niveau opérationnel (indicateurs au niveau "bas" de la chaîne d'analyse)	<p>Intéropérabilité sémantique pour un travail collaboratif. <i>"Dans une entreprise étendue, les équipes distribuées, multidisciplinaires et coopératives sont la norme."</i> [Terzi et al., 2010].</p> <p>Management de la donnée. Travail sur des documents informatisés en lien avec un système global de gestion des connaissances (<i>"Mettre en place un PLM efficace implique de réduire cette galaxie à un flux de données cohérent, en évitant les redondances et les lacunes"</i> [Terzi et al., 2010] et <i>"les utilisateurs travaillent avec des fichiers et des informations qui peuvent affecter toute une organisation."</i> [Saenz et al., 2018].</p>
Niveau interactionnel (indicateurs au niveau de l'interaction humain-technologie)	<p>L'expérience utilisateur pour une amélioration de la performance. Des éléments ont été mis en place pour améliorer l'expérience utilisateur : un système de feedback, une organisation du logiciel centrée sur les tâches, incitation au succès [Lunenbourg, 2011].</p>

Ce tableau permet de montrer des liens entre les niveaux bas (niveau bas et niveau d'interaction) et les niveaux plus structurants (niveau managérial et niveau culturel). Par exemple, la culture de l'efficacité dans la production et la traçabilité des pièces d'un produit se retrouvent dans plusieurs niveaux de lecture de l'outil (niveau technique, opérationnel, managérial et culturel). En partant de l'interaction entre l'utilisateur et l'outil PLM, nous pouvons voir que les tâches des usagers¹ sont clairement définies, séparées en micro-tâches et un contrôle des différentes actions est mis en place. Cette interface

1. Les termes usagers et utilisateurs sont utilisés dans ce chapitre comme des synonymes.

permet, au niveau opérationnel, d'avoir des données fiables sur lesquelles plusieurs agents de la chaîne opérationnelle peuvent s'appuyer (et même collaborer) pour une meilleure performance [Bouhaddou et al., 2012].

Il a été possible de voir apparaître dans l'analyse un lien entre le type d'interaction entre le concepteur et l'artefact et les valeurs plus structurantes d'une organisation. La transition écologique implique certaines valeurs et il est possible de se demander s'il est nécessaire que ces valeurs se retrouvent dans les interactions humains-technologie, en particulier dans les interactions humains-machines (IHM).

Cette illustration consolide le fait de souhaiter soutenir cette proposition dans cette thèse. Afin de pouvoir évaluer scientifiquement cette proposition, la section suivante cherche à expliciter une hypothèse sous-jacente au travail de thèse qui est la suivante : la compréhension des interactions entre les différents niveaux permettra de mieux aligner les valeurs identifiées dans l'IHM avec les valeurs culturelles collectives nécessaire pour accompagner (voir accélérer) la transition écologique.

Réflexion sur le désalignement des valeurs entre artefacts et membres d'une communauté

Il est nécessaire d'aligner les valeurs identifiées dans l'interaction humain-machine et les valeurs culturelles d'une communauté. Quels sont les risques pour une communauté de se doter d'artefacts numériques trahissant les valeurs de base de cette communauté? [Ghoshal et al., 2020] montre que les contextes spécifiques des communautés regroupées autour de valeurs telles que l'inclusivité et la confiance dans les individus composant le groupe ont des conséquences sur les organisations sociales de ces communautés. De plus, les artefacts numériques utilisés sont en interaction avec ces organisations sociales [Masino and Zamarian, 2003, Orlikowski, 1992]. Ainsi, les valeurs, le type d'organisation et les artefacts utilisés sont liés. Nous retrouvons ainsi les 3 éléments constitutifs de la technologie présentés dans le chapitre 2, Figure 2.7.

Dans ses travaux, [Ghoshal et al., 2020] s'intéresse au mouvement "Southern Movement Assembly" (SMA) regroupé autour des valeurs de l'inclusivité et du fait de donner la parole aux personnes sous-représentées dans les modes de gouvernances classiques (les populations noires par exemple). Ghoshal explique que les outils informatiques choisis par la communauté impactent la communauté en déplaçant les zones de pouvoir. Ainsi, les personnes de la communauté ayant plus de compétences techniques gagnent du pouvoir et contrôlent les processus décisionnels de la communauté, cela allant à l'encontre des valeurs d'inclusivité de cette communauté. Ainsi, les outils informatiques peuvent à la fois accompagner des communautés (dans leur organisation, dans leur développement) tout en "trahissant" certains de leurs fondamentaux.

La technique n'a donc pas uniquement un rôle social, elle est également un phénomène culturel à part entière. L'usage de techniques peut modifier l'organisation sociale initialement établie (système démocratique de la communauté SMA) et changer les processus de gestion de la communauté. En ce sens, la technologie (comprise comme de la technique et de la culture) est entremêlée à l'organisation sociale et agit sur cette organisation. L'outil informatique a donc des impacts à différents niveaux d'une organisation sociale et n'est pas neutre.

Conclusion : Le non-respect des valeurs fondamentales d'une communauté par les effets d'outils numériques peut trahir les valeurs de cette communauté et ainsi la perturber. L'adéquation entre valeurs des artefacts et valeurs de la communauté semble donc indispensable. Ainsi, l'usage d'artefacts numériques peut entraîner des impacts environnementaux et sociaux importants qui peuvent nuire à la transition écologique. Cependant, certaines valeurs de la culture numérique peuvent servir de socle sur lequel peut s'appuyer la transition écologique.

La proposition de structuration en 4 niveaux de l'analyse des interactions en ingénierie entre valeurs individuelles et collectives pour identifier les éléments structurants de la transition écologique peut donc être abordée du point de vue de l'usage des artefacts numériques en conception. La mobilisation d'artefacts suscitant l'usage des valeurs en phase avec les valeurs collectives nécessaires à la transition écologique doit permettre d'accompagner la transition qui peut être alors à la fois numérique et écologique.

Avant de clore ce chapitre et proposer une méthode de recherche pour répondre à cette question, il s'agit de préciser l'état de l'art sur les interactions humains-machines dans les activités d'ingénierie et plus précisément les activités de conception.

3.2 Étude des artefacts dans les communautés d'ingénierie et des interactions humains-machines

L'objectif est ici de mieux comprendre comment fonctionne l'interaction humain - machine en ingénierie. Cette question est abordée suivant deux points de vue, chacune représentée dans une section. La première section se place du point de vue de l'ingénierie pour la soutenabilité et est consacrée au rôle des artefacts dans les processus d'ingénierie. La seconde section se place du point de vue des interactions humains - machines et est dédiée au rôle des artefacts numériques dans les communautés écologiques.

3.2.1 Étude du rôle des artefacts dans les processus d'ingénierie

Cette section présente synthétiquement les résultats de travaux de recherche permettant de mieux appréhender le rôle des artefacts en ingénierie de la conception, et les mécanismes de collaboration qui s'articulent autour d'eux.

Des objets intermédiaires vecteurs de langages communs

Un premier ensemble de travaux autour de la notion d'objets intermédiaires va être présenté [Vinck, 1992]. L'hypothèse faite dans ce corps d'études est que les détails des artefacts doivent être pris en compte pour comprendre l'action collective. Le terme "objet intermédiaire" qualifie les objets qui circulent entre les membres d'un réseau. [Vinck, 2009a] a identifié que les membres les plus actifs au sein d'un réseau consacraient "un temps considérable à concevoir, négocier, produire et faire circuler des "objets" de toute sorte".

Des travaux se sont spécifiquement intéressés aux contextes de conception, notamment [Mer et al., 1995, Laureillard et al., 1997, Vinck and Laureillard, 1996, Boujut and

[Blanco, 2003]. Par exemple, [Boujut and Blanco, 2003] montrent que certains artefacts (objets, modèles, plans physiques ou numériques) jouent un rôle de médiateurs pour la co-construction de représentations partagées au sein d'un groupe d'acteurs d'un projet d'ingénierie. En prenant un exemple en ingénierie de la conception, les auteurs montrent que, dans une activité collaborative, les artefacts jouent un rôle d'interface pour transmettre des connaissances, des savoirs, des représentations partagées.

Les auteurs utilisent le concept d'objet intermédiaire comme cadre de compréhension du rôle des objets dans le processus d'ingénierie de la conception. Selon [Jeantet, 1998], les objets intermédiaires ont trois "registres"² (la traduction, la médiation et la représentation) décrits rapidement ci-dessous :

- **La traduction** : un objet est finalement le passage (la traduction) de besoins exprimés par certains acteurs à un état de produit fini, en passant par une multitude d'étapes (produit dessiné, produit pré-conçu, prototype, etc.). En passant par ces différentes étapes, il y a toujours un processus de traduction entre l'étape amont et l'étape aval, avec un changement des règles, des conventions entre acteurs. Cette traduction n'est cependant pas une traduction directe de la pensée des acteurs car ces derniers doivent "composer avec les instruments leurs permettant de la construire et de l'exprimer" [Jeantet, 1998].
- **La médiation** : l'artefact³ met en lien différentes manières de comprendre le produit à développer. Ainsi, les acteurs des différents secteurs se doivent de construire un langage commun ("faciliter l'intercompréhension entre les services et les métiers, voire entre les partenaires industriels" [Jeantet, 1998, p307])
- **La représentation** : les multitudes étapes pour la création d'un artefact entraîne la conception de différents objets. Ces objets peuvent être des objets intermédiaires car ils sont la représentation d'un produit en cours de conception. Ils peuvent être considérés comme la projection des caractéristiques désirées du produit par les acteurs (anticipation du futur produit). Si je me réfère au cadre de [Gero and Kannengieser, 2004], présenté dans le chapitre 2, je peux dire que les objets intermédiaires sont une mise en action du monde attendu du concepteur comme une implémentation du monde attendu (le monde interprété, c'est-à-dire la représentation interne du concepteur). Les objets intermédiaires trouvent leur sens dans le contexte dans lequel ils sont utilisés : ils sont contextualisés.

[Vinck, 2009b] donne une liste d'exemple d'objets intermédiaires présents dans les réseaux scientifiques : des textes (rapports intermédiaires, de la documentation technique ou encore des protocoles), des logiciels, des plateformes technologiques. Si l'on prend l'exemple des rapports intermédiaires, ces derniers peuvent être des supports traduisant des besoins exprimés par certains acteurs (groupe A) à d'autres acteurs (groupe B) et ainsi servir de support à la médiation entre le groupe A et B. Le groupe A exprime sa vision attendue d'un objet via un rapport intermédiaire et le transmet au groupe B. Les rapports intermédiaires dans les réseaux scientifiques peuvent être rapprochés des documents échangés entre des acteurs d'un processus de conception. Les différentes représentations du produit en cours de conception (donc plusieurs objets différents en

2. Le terme "registre" est utilisé par les auteurs sur les objets intermédiaires et est compris comme un synonyme de "fonction".

3. L'artefact peut être un concept, un objet matériel ou immatériel.

réalité) font office d'objet intermédiaire car ce sont des interfaces entre les différents acteurs du projet. Ces objets intermédiaires, qui sont par exemple des représentations du produit final (un cahier des charges ou un plan par exemple), servent d'interface pour l'échange entre les acteurs pour que ces derniers se mettent d'accord sur l'objet à produire. Comme la création d'un produit demande le passage d'une idée à un artefact (en passant par une multitude d'états), ce processus demande des connaissances et compétences variées mobilisées par différents acteurs (département du design, de la forge et de la production dans l'exemple de [Boujut and Blanco, 2003]).

"Lors de la création du modèle de surface, le concepteur a utilisé des connaissances issues du domaine de la forge (rayons d'angle, angles de dépouille, etc.). Dans sa tâche, il a surtout réutilisé des conceptions antérieures (morceaux de modèles) comme support ainsi que son expérience personnelle. Dans un processus coopératif, ce processus de transformation devient collectif. Par conséquent, le processus de traduction nécessite des connaissances partagées entre les participants. Ce processus de transformation d'un objet nécessite de la part du participant une explication constante des choix qu'il fait ou de la modification qu'il propose. Il conduit progressivement à une compréhension commune de la situation de conception et crée un fond commun à tous les participants. Les objets sont à la fois les traces et les résultats de ce processus." [Boujut and Blanco, 2003, p.7].

Les artefacts sont un support à l'information. En reprenant les termes de [Gero and Kannengiesser, 2004] il est possible de dire que les informations proviennent du monde externe et sont interprétées par le concepteur afin de construire un monde interprété. Ainsi, les artefacts peuvent avoir un impact sur la manière dont le concepteur construit son monde attendu. Les artefacts ont des rôles majeurs dans le transfert d'informations entre les acteurs. Selon [Bratec, 2020], l'information est la clé de la conception responsable. Ainsi, les artefacts, via leurs caractéristiques et les informations qu'ils véhiculent sont des éléments importants à prendre en compte dans la transition écologique. Les connaissances construisant le monde interprété viennent de l'identification, la perception et l'interprétation de l'information reçues depuis le monde réel.

<p>Conclusion : Les artefacts peuvent être des mediums par lesquels les acteurs d'un processus d'ingénierie entrent en collaboration et transmettent des représentations, des connaissances, des manières d'anticiper les caractéristiques (fonctions, comportements, structures) du produit ou service à concevoir. C'est également via ces artefacts que les acteurs alimentent leur monde interprété et se projettent dans un monde attendu.</p>
--

Nous avons vu que les artefacts jouent des rôles intermédiaires entre les individus dans les processus de conception. Ces artefacts sont donc des éléments cruciaux qui peuvent véhiculer des représentations, des idées, des valeurs. Nous avons vu dans la section 2.2.3 que les actions sont influencées par nos compétences, nos valeurs, notre cosmologie et que ces derniers éléments sont également influencés par nos actions. Ainsi, il semble important de comprendre dans quelle mesure les artefacts et les interactions avec eux embarquent et transmettent des valeurs car ces valeurs peuvent être transmises lors des activités d'ingénierie. C'est l'objet de la prochaine section.

Les valeurs associées à l'usage des artefacts

Cette section est dédiée à l'étude des valeurs embarquées dans les artefacts et leurs usages.

Deux manières de comprendre le lien entre les artefacts et les valeurs vont être présentées dans le prochain chapitre.

Klenk propose dans son article "How do technological artefacts embody moral values?" une explication du lien entre valeurs et artefacts [Klenk, 2021]. Pour lui, les valeurs d'un artefact ne sont pas issues des fonctions de l'artefact et de la volonté du concepteur (thèse soutenue par [van de Poel and Kroes, 2014]). Pour Klenk, les valeurs sont liées aux propriétés intrinsèques et extrinsèques de l'artefact : "... notons que les artefacts peuvent avoir une valeur instrumentale : ils permettent une action qui peut en elle-même être précieuse, et l'artefact a de la valeur en permettant de la réaliser." Pour développer sa théorie, Klenk utilise le concept d'"affordance" et celui de "response-dependent properties" que je traduis par "propriétés dépendantes de la réponse". Ainsi, selon Klenk, l'artefact incarne une valeur et propose une affordance aux usagers dans des conditions spécifiques. En conséquence de cette potentialité, si elle a été réalisée, alors il sera possible de dire si la propriété de l'objet était positive ou négative. Klenk prend l'exemple d'un fusil d'assaut de type AK47 : ce type d'arme donne la potentialité pour son usager de tuer un grand nombre de personnes facilement. Il conclut : "Permettre de tuer, cependant, est une valeur finale négative (propriété dépendante de la réponse) et nous avons des raisons morales de s'y opposer. Par conséquent, l'AK47 est moralement mauvais."

Cependant, ces valeurs liées aux affordances et au contexte d'usage de l'artefact sont également liées à la volonté du concepteur. L'artefact n'est pas indépendant du processus de conception. En effet, les buts et les fonctions de l'objet sont issus du processus de conception auquel prend part le concepteur. Ainsi, mon positionnement se rapproche de la thèse de [van de Poel and Kroes, 2014] dans le sens où je soutiens que l'artefact technologique embarque des valeurs qui sont induites par le processus de conception. De plus, ces valeurs peuvent s'exprimer de différentes manières selon le contexte de l'interaction humain-machine.

Ainsi, mon positionnement combine les deux propositions présentées dans cette section : les valeurs d'un artefact sont extrinsèques et intrinsèques. Elles sont extrinsèques car elles proviennent du concepteur et qu'elles dépendent de l'interaction entre l'utilisateur et cet artefact. Elles sont également intrinsèques dans le sens où certaines valeurs intégrées à l'objet dans le processus de conception deviennent immuables, sont ancrées dans cet artefact.

<p>Conclusion : En plus de jouer des rôles intermédiaires significatifs (traduction, médiation, représentation), les artefacts portent des valeurs. Ainsi, ces artefacts ne sont pas neutres et doivent être conçus avec précaution, notamment dans des contextes où des systèmes de valeurs spécifiques sont défendus.</p>
--

Forts de cette conclusion, il s'agit à présent d'étudier le rôle des artefacts numériques dans les communautés intentionnelles focalisées sur la transition écologique. La synthèse de plusieurs contributions mobilisant les concepts de culture, d'informatique et de transition écologique va être présentée.

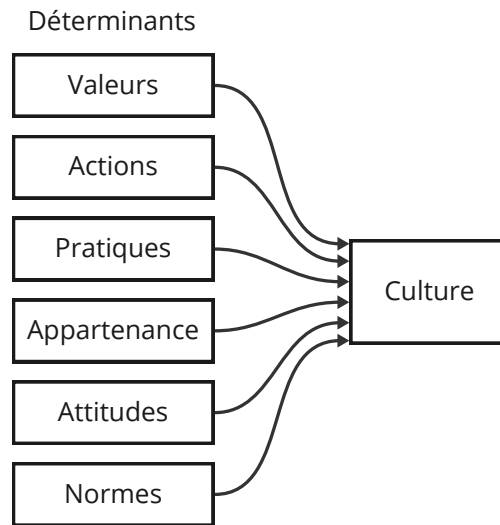


FIGURE 3.2 – Représentation des différents déterminants d'une culture

Chaque bloc de la colonne de gauche représente un déterminant culturel. Les déterminants sont : valeurs, actions, pratiques, appartenance, attitudes, normes. Les flèches désignent le fait que chaque bloc est un déterminant de la culture des individus et des groupes.

3.2.2 Étude du rôle des artefacts numériques dans les communautés écologiques

Cette partie est dédiée à un état de l'art entre les artefacts numériques et la culture. Cela devrait permettre de comprendre si une culture peut s'exprimer à travers des artefacts numériques, puis de comprendre quel type de culture et de valeurs associées sont cohérents avec la transition écologique.

Informatique culturelle : une méthode d'identification des déterminants culturels

Un focus va être réalisé sur le lien entre la culture et les artefacts numériques. Après une définition rapide de la culture, la théorie de l'informatique culturelle va être utilisée afin de montrer qu'une culture peut s'exprimer via une interaction humain-machine.

Définitions

La terme culture vient du latin *cultura*, issu du verbe *colere*, qui signifie cultivation. Pour certains auteurs chrétiens, *cultura* signifie également culte. [Kroeber and Kluckhohn, 1952] rassemblent plus d'une centaine de définitions du mot culture et les regroupent en thématiques : les définitions descriptives, historiques, normatives, psychologiques, structurelles, génétiques et les définitions incomplètes. Dans ce manuscrit, la culture est comprise comme un ensemble d'attitudes, de normes, de valeurs, d'actions, de pratiques ou d'appartenance à un groupe (religieux, social, etc) [Rauterberg, 2015]. Ces éléments (attitudes, normes, valeurs, actions, pratiques, appartenances) forment les déterminants d'une culture. Ces éléments sont représentés dans la figure 3.2.

Ainsi, la culture est composée de multiples éléments et un individu est composé de différentes cultures. C'est ce que nous pouvons tirer du travail de [Karahanna et al., 2005].

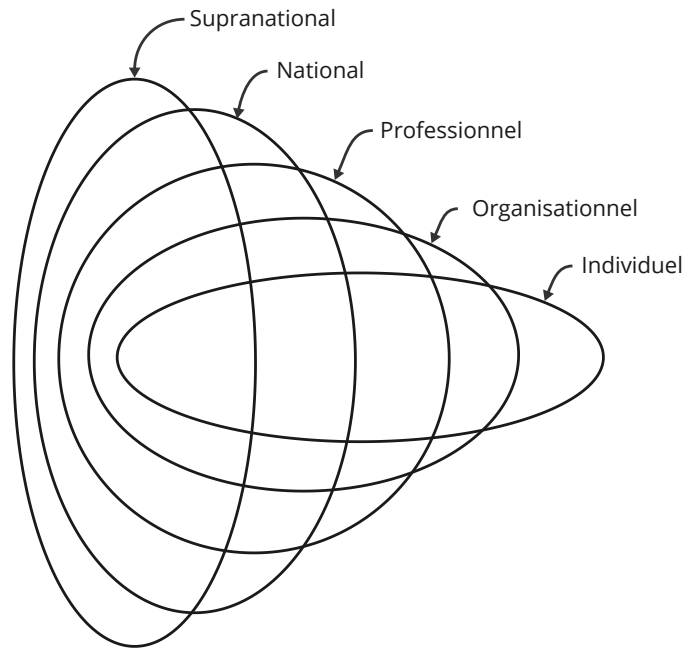


FIGURE 3.3 – Niveaux entremêlés de la culture, reproduit et traduit de [Karahanna et al., 2005]

Cette figure est composée de plusieurs cercles imbriqués. Chaque cercle représente un niveau de culture. Les niveaux de culture identifiés par les auteurs sont : supranational, national, professionnel, organisationnel, individuel.

Les auteurs montrent que chaque individu est imbriqué dans plusieurs niveaux culturels appris à différents moments de sa vie (personnelle et professionnelle). Les valeurs et les pratiques d'un individu sont influencées par cette culture, de même que ses croyances. Ainsi, cultures, pratiques et valeurs sont intimement liées. C'est ce qui est représenté dans la figure 3.3.

L'informatique culturelle

Dans son article "From personal to cultural computing : how to assess a cultural experience", [Rauterberg, 2015] décrit l'histoire des interactions humain-ordinateur (*human-computer interaction*) en la divisant en 4 mouvements d'intérêts qui se superposent. Selon Rauterberg, l'histoire des interactions humain-ordinateur commence autour des années 60 avec le paradigme de l'interaction humain-machine qui s'opérait entre une personne seule et un ordinateur fixe (*personal computing*). Dans les années 80, cette interaction "s'enrichit" dans le sens où les ordinateurs sont en réseau et des items autres que du texte (image par exemple) peuvent être envoyés. Rauterberg parle alors de *cooperative computing*. Dans les années 2000, c'est au tour du paradigme *social computing* de s'imposer. Ce paradigme est arrivé au même moment où l'usage de l'informatique se fait par différents media comme le téléphone, la tablette, les objets connectés (capteurs industriels ou domotique). De plus, l'expérience utilisateur prend de l'importance (amélioration de cette expérience), avec la formation de communautés d'utilisateurs autour des objets ou des logiciels. Enfin, Rauterberg présente un nouveau paradigme, le *cultural computing*, traduit ici par "informatique culturelle". Ce paradigme traduit le fait que des cultures expriment

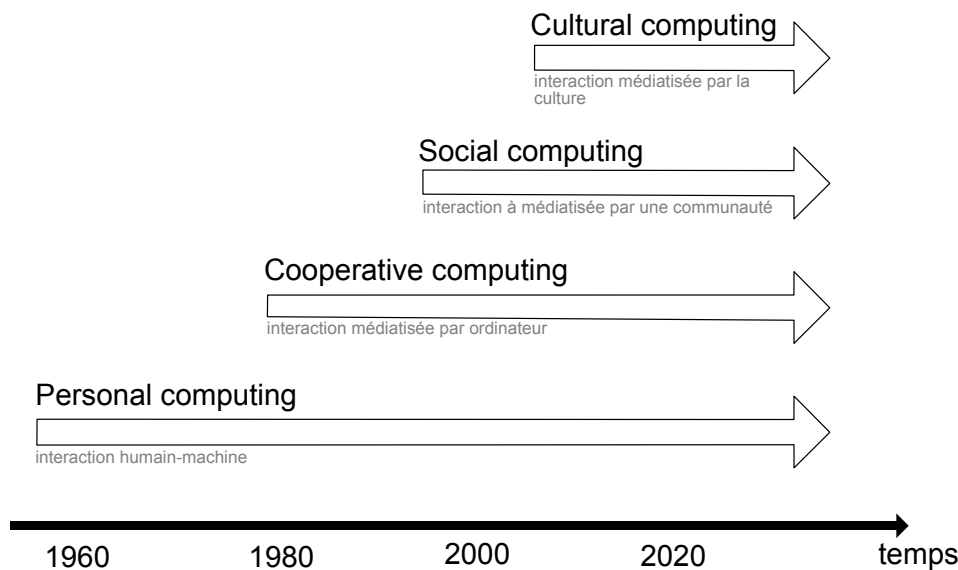


FIGURE 3.4 – Apparition des différents paradigmes en interaction humain-machine, reproduit et traduit de [Rauterberg, 2015]

La figure représente une chronologie de 1960 à 2030 avec l'apparition des différents paradigmes d'IHM. Le paradigme *personal computing* commence peu avant les années 1960 et est toujours présent de nos jours. Chaque paradigme s'ajoute aux précédents. Le *cooperative computing* est apparu au début des années 1980, le *social computing* peu avant les années 2000 et enfin le *cultural computing* est apparu autour des années 2010 (selon [Rauterberg, 2015]).

leur déterminants (culturels) de manière différente dans l'interaction entre l'utilisateur et la machine. J'ai exploré ce sujet dans l'article [Grimal et al., 2021b].

Les paradigmes exposés dans le paragraphe précédent ne disparaissent pas les uns après les autres mais se superposent (cf figure 3.4). En effet, les paradigmes personnel, coopératif et social sont toujours présents et parfois se superposent [Rauterberg, 2015].

Le *cultural computing* est le phénomène selon lequel "différentes cultures du monde ont besoin d'avoir des approches différentes pour exprimer leurs particularismes culturels." [Rauterberg, 2015]⁴. J'ai montré dans le chapitre précédent que la transition écologique nécessite un changement culturel. Quelles sont les caractéristiques des artefacts numériques propres à l'ingénierie pour la soutenabilité ?

Conclusion : Des déterminants culturels peuvent s'exprimer dans des outils informatiques. La transition écologique étant porteuse de changements culturels, je considère l'ingénierie dans un contexte de soutenabilité forte comme une pratique d'ingénierie portant une culture spécifique qui peut être médiatisée dans des outils numériques.

Il est alors intéressant d'analyser plus précisément les enjeux de l'alignement des valeurs embarquées dans les artefacts informatiques avec leurs contextes d'usages. En effet,

4. Des auteurs ont implémenté des caractéristiques culturelles dans un artefact numérique, offrant une expérience de la culture orientale sur un ordinateur, le ZENetic Computer [Tosa, 2016], [Tosa et al., 2004]

si les outils informatiques peuvent médiatiser une culture, la question de l'alignement des artefacts informatiques par rapport aux contextes d'usages soutenables doit être soulevée. C'est la raison pour laquelle la prochaine section est dédiée à un état de l'art sur les recherches en IHM autour des communautés écologiques.

La permaculture comme source d'inspiration pour la conception d'artefacts numériques

Des études issues de la communauté informatique (ACM⁵, LIMITS⁶, CSCW⁷) décrivent des expériences d'intégration d'artefacts numériques dans des communautés en transition écologique. L'un des éléments distinctifs de ces communautés est qu'elles disposent d'un système de production de nourriture alternatif, basé sur les principes de la permaculture. Ces derniers sont décrits dans cette section ainsi que la philosophie autour de la production alimentaire. Cette section permet de voir comment la permaculture influence l'ensemble des activités des communautés en transition écologique.

Les travaux sur ces communautés ont permis de mieux comprendre comment les valeurs autour des modes de vie soutenables peuvent être médiatisées dans les artefacts numériques (dans leur matérialité, dans les logiciels, dans les fonctions). Par exemple, [Brynjarsdottir et al., 2012] affirme : "Les technologies modernistes se caractérisent par le fait qu'elles sont conçues du point de vue d'un expert, qu'elles s'orientent vers ses modèles formels et qu'elles ont tendance à s'abstraire des détails sur le terrain. De ce fait, elles traitent mal les particularités socioculturelles. En ne prenant pas pleinement en compte les nuances et les complexités de la vie quotidienne, plusieurs chercheurs ont affirmé que la soutenabilité persuasive a tendance à laisser de côté des préoccupations et des valeurs importantes, ce qui nuit à l'efficacité à long terme de ces interventions. [Dillahunt et al., 2009, Froehlich et al., 2010, Pierce et al., 2010, Strengers, 2008, Strengers, 2011]." L'idée n'est pas de critiquer les travaux autour des technologies persuasives mais de montrer que d'autres manières de penser la relation entre les artefacts numériques et la soutenabilité sont possibles. Dans la citation, Brynjarsdóttir montre que la prise en compte du contexte ainsi que des savoirs qui y sont cités (savoirs vernaculaires) est pertinente dans le processus de conception des technologies numériques. De plus, il propose d'aller au-delà des technologies persuasives. Cette proposition est également soutenue par [Liu et al., 2018], pour qui les interactions humains-machines soutenables doivent sortir de deux paradigmes : (1) le "contrôle" de la consommation des ressources et (2) la "correction" des comportements non-soutenables des usagers. La permaculture est présentée par [Liu et al., 2018], comme une alternative à cette tentative de contrôle.

La permaculture est une démarche, une philosophie qui définit une relation de coopération avec la nature. Bill Mollison définit la permaculture de cette manière : "La permaculture est une philosophie pour travailler avec la Nature, au lieu de lutter contre elle ; pour une observation prolongée et réfléchie au lieu d'un travail prolongé et irréfléchi ; pour considérer les plantes et les animaux dans toutes leurs fonctions au lieu de traiter chaque lieu comme un système ne produisant qu'une seule chose." [Hopkins, 2010]. Liu propose de mobiliser ce concept comme une alternative au contrôle car la pratique de

5. <https://www.acm.org/>

6. <https://computingwithinlimits.org>

7. <https://cscw.acm.org>

l'agriculture se fait sans domination de la nature, plutôt en collaboration avec la nature : l'humain est un collaborateur parmi d'autres. Trois principes éthiques caractérisent la permaculture : care for the Earth, care for the people, fair trade.

Afin de démontrer ses propos, Szu Yu (Cyn) Liu présente, à travers des travaux ethnographiques, le rapport au monde des personnes pratiquant la permaculture [Liu et al., 2018]. Ses travaux étudient le rôle des artefacts numériques dans les pratiques agricoles. Plusieurs éléments d'éthique sont mis en avant, à la fois dans la pratique agricole et l'usage des artefacts soutenant la pratique agricole en question. Ces éléments d'éthique sont :

- Contribuer à la régénération des ressources en prenant le juste nécessaire (le surplus est rendu à la terre) ;
- Partager sa production avec des non-humains afin de positionner l'humain en collaborateur avec la nature (et non par un rapport de domination) ;

Un autre exemple concerne les travaux de [Norton et al., 2019a]. En effet Norton et ses collègues montrent dans quelle mesure la mise en place d'une communauté travaillant en permaculture nécessite des systèmes informatiques spécifiques afin d'accompagner le développement de ces communautés. Ces travaux se basent sur des travaux préliminaires de [Norton et al., 2019b]. Plus précisément, [Norton et al., 2019a] décrivent comment un système de distribution de ressources (ces ressources étant centrées sur les connaissances en plantes pour une pratique commune de la permaculture dans une communauté) a été pensé pour coller aux besoins, aux valeurs et au fonctionnement des membres de la communauté étudiée.

Ainsi, les valeurs de la communauté autour de la permaculture, autour de l'éthique du *care*, peuvent être embarquées dans les systèmes informatiques utilisés. L'intégration d'une certaine éthique du *care* dans les pratiques d'ingénierie est abordée dans le chapitre 4, notamment avec des exemples en lien avec la méthode d'analyse de cycle de vie et les outils logiciels associés.

<p>Conclusion : La littérature scientifique autour des artefacts informatiques dans les communautés intentionnelles formées autour de la transition écologique montre que les artefacts numériques doivent porter des valeurs et des caractéristiques spécifiques liées à la transition écologique. Ces caractéristiques portent sur les notions de complexité, de potentialités à collaborer et le fait de prendre soin de son milieu (naturel et social).</p>
--

3.3 Question de recherche et proposition

Cette section permet de présenter la construction de la proposition et la méthode pour tester cette proposition.

3.3.1 Construction de la proposition

En synthétisant les conclusions intermédiaires de ce chapitre 3 il est possible de présenter les hypothèses principales de travail, la question de recherche d'intérêt et la proposition de recherche visant à répondre à la question de recherche d'intérêt.

Hypothèses

Grâce aux chapitres 2 et 3, il a été possible de formuler des hypothèses sur lesquelles la proposition est construite. En effet, sept hypothèses fortes ont été formulées et sont rappelées ici :

Des hypothèses autour de la transition écologique :

- Une transition écologique est nécessaire pour sortir de la dynamique de dépassement des limites planétaires dans laquelle les sociétés occidentales sont ancrées ;
- La transition écologique est comprise comme un changement culturel de la société, c'est-à-dire un changement au niveau des valeurs, croyances, normes, attitudes, appartenances, actions ;
- Ces travaux de thèse se positionnent dans un contexte de soutenabilité forte, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de substituer technologies et phénomènes naturels.

Des hypothèses autour des pratiques d'ingénierie :

- L'ingénierie évolue au fil des contextes. Ainsi, dans un contexte de transition écologique, l'ingénierie peut évoluer pour devenir porteuse de valeurs et de pratiques soutenables ;
- Les technologies et les pratiques d'ingénierie ne sont pas neutres et portent des valeurs, des normes et des croyances ;
- Les artefacts conditionnent des pratiques d'ingénierie. Ainsi, il est nécessaire de travailler sur les objectifs de l'ingénierie et sur les artefacts utilisés, notamment les artefacts numériques ;
- La permaculture est une manière de vivre et d'agir avec le monde qui nous entoure en cohérence avec un paradigme de soutenabilité forte. Les artefacts numériques et pratiques d'ingénierie peuvent s'inspirer de cette éthique de vie pour évoluer.

Formulation d'une question de recherche

Sur la base de ces éléments, j'ai pu formuler une première question de recherche : **dans un contexte de transition écologique, dans quelle mesure l'ingénierie peut-elle évoluer vers d'autres manières d'être et d'être pratiquée ?** L'ingénierie est une activité collaborative, supportée par des artefacts. J'ai choisi d'aborder cette question de recherche via l'analyse de méthodes d'ingénierie pour la soutenabilité supportées par des artefacts numériques. Cela va permettre d'aborder davantage les problématiques liées aux

interactions humains-machines. Cela m'amène à me poser la question du rôle de l'informatique dans la transition écologique, ainsi que le rôle des méthodes actuelles d'ingénierie pour la soutenabilité dans cette transition. Ainsi, je peux résumer mes réflexions en deux questions : **est-ce que le numérique a une place dans la transition écologique ? Quelles sont les caractéristiques des outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ?**

Ces deux questions de recherche génériques me permettent de formuler une question de recherche ciblée c'est-à-dire appliquée à un cas particulier (l'analyse environnementale) : "Est-ce que le logiciel d'analyse de cycle de vie est un artefact numérique correspondant aux valeurs, pratiques et compétences d'utilisateurs souhaitant aborder l'évaluation environnementale comme un outil vers la soutenabilité forte des systèmes socio-techniques ?" Cette question est directement adressée dans les expérimentations (présentées dans le chapitre 5) et permet de répondre aux deux questions de recherche génériques.

Proposition

Sur la base de ces hypothèses, je propose que l'ingénierie puisse évoluer vers une *permaingénierie*. J'emprunte ce mot à Rémi Céret qui l'a utilisé lors de sessions de réflexions communes au cours de l'année 2019⁸. Cette permaingénierie est définie comme un ensemble d'activités socio-techniques qui permettent de prendre soin de son milieu, notamment des vivants. Cette définition provisoire va être détaillée dans le chapitre 4.

Cette pratique d'ingénierie soutenable devrait être accompagnée de méthodes et outils en accords avec les principes de la transition écologique. Ainsi, je vais également étudier dans quelle mesure des artefacts numériques ont leur place dans les pratiques de permaingénierie.

3.3.2 Méthode

Cette section permet d'expliquer le cheminement de la thèse. Afin de traiter l'objectif et les questions de recherche, j'ai structuré mon travail de thèse en 4 étapes :

1. Identification de la problématique ;
2. Formalisation de la proposition ;
3. Test de la proposition ;
4. Discussion, conclusion et perspectives.

Chaque étape est composée de plusieurs types d'investigations : conceptuelles, empiriques, techniques. Ces investigations sont détaillées dans le chapitre 5. La partie ci-dessous décrit la figure 3.5.

8. Une des synthèses de ces réflexions peut être trouvée ici : <https://drive.google.com/file/d/1i94wV5gRGzUzUU4HKtOZJdrvDC-YSSbw/view>. D'autres éléments ont fait l'objet d'une publication scientifique, notamment [Grimal et al., 2022]. Par ailleurs, le terme de permaingénierie apparaît dans la littérature grise, notamment dans les articles de Jean-Pascal Blois : <https://usbeketrica.com/fr/la-permaingenierie-mouvement-pour-une-ethique-de-l-ingenieur-dans-un-monde-en-declin-partie-1-sur-2>

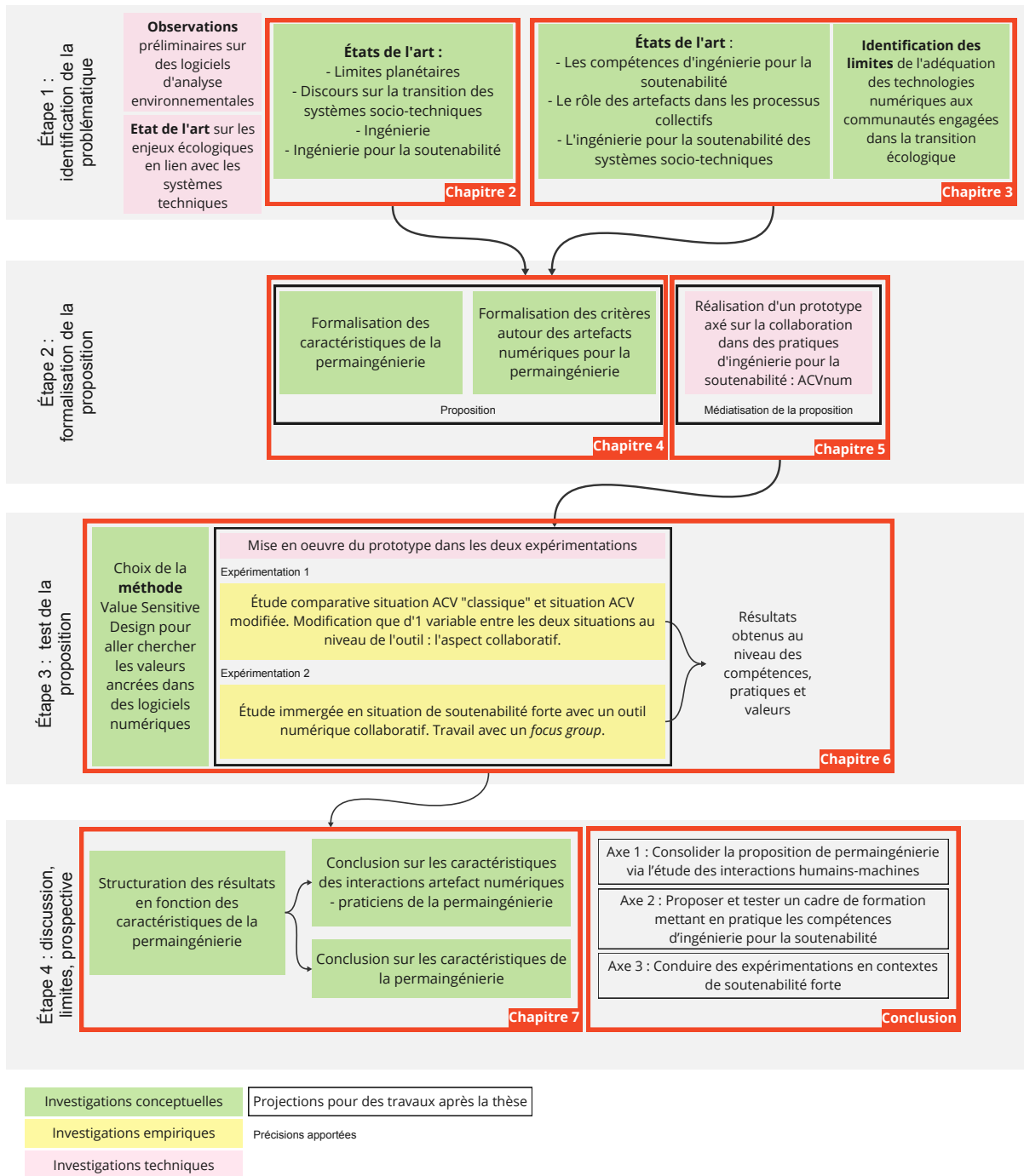


FIGURE 3.5 – Étapes dans le projet de thèse

La figure est composée de 4 blocs, organisés de haut en bas. Chaque bloc correspond à une étape de la démarche. Les chapitres encadrent des investigations menées au sein de chaque bloc.

Lors de la phase d'identification de la problématique, un état de l'art a été réalisé sur les limites planétaires et l'ingénierie. En effet, la thèse a pour départ le constat que l'ingénierie évolue en fonction des contextes historiques et que l'entrée dans l'Anthropocène mène à des changements historiques majeurs. Étant donné que je me positionne

dans le courant des *sustainability transitions*, je pars du principe que la transition doit être compatible avec une justice sociale [Khmara and Kronenberg, 2020]. L'autre point de départ est l'importance des artefacts dans les processus d'ingénierie. J'ai choisi un artefact d'ingénierie pour la soutenabilité, les logiciels d'analyse de cycle de vie. J'ai donc observé des étudiants et des acteurs ancrés dans un paradigme de soutenabilité forte en train d'utiliser un logiciel d'ACV. J'ai tenté d'identifier des éléments techniques pouvant aller à l'encontre des valeurs, principes et pratiques d'une forme d'ingénierie pour la soutenabilité. Sur la base de l'identification de cette problématique, plusieurs éléments ont été investigués pour être consolidés : le rôle des artefacts dans les processus collectifs d'ingénierie, le lien entre les compétences et les valeurs, l'ingénierie pour la soutenabilité, la formalisation d'un prototype à partir des observations.

La consolidation de ces éléments a permis de définir une matrice en 4 étapes, liant les types d'interactions aux valeurs portées par les usagers. Cette thèse est centrée sur le lien entre les caractéristiques techniques des artefacts numériques d'ingénierie et les valeurs d'ingénierie pour la soutenabilité. Sur la base de ces éléments, un outil numérique pour la soutenabilité a été choisi, un logiciel d'analyse de cycle de vie, afin d'observer comment les caractéristiques du logiciel peuvent être cohérentes avec des objectifs d'ingénierie pour la soutenabilité. Ainsi, un prototype de logiciel d'analyse de cycle de vie a été développé avec des caractéristiques techniques favorisant la collaboration entre les parties prenantes d'une démarche d'analyse environnementale. L'ensemble de ces éléments a permis de formaliser une proposition.

À partir des observations préliminaires et la proposition technique conçue, deux situations expérimentales ont été déployées pour tester la proposition : (1) une situation avec des futurs ACVistes se positionnant dans un paradigme de soutenabilité forte et (2) une situation d'analyse environnementale dans un contexte de soutenabilité forte, en l'occurrence, un éco-hameau. Un éco-hameau est une agglomération rurale qui s'organise autour de trois éléments majeurs : un modèle économique alternatif, un mode de vie autour de l'écologie et une vie communautaire active. Les situations expérimentales étaient proches de situations de recherche-actions. Des analyses d'entretiens axés sur les valeurs et les motivations des personnes ont été réalisées.

La partie discussion, limite et perspectives permet de définir plus précisément les connaissances produites issues de ces expérimentations. En effet, les données brutes traitées ont ensuite été regroupées en thématiques. Dans un premier temps, une analyse des correspondances a été faite entre la démarche ACV, l'usage d'un logiciel d'ACV et les habitudes quotidiennes de l'éco-hameau. Dans un deuxième temps, une étude de la perception de la collaboration comme un risque a été réalisée. Dans un troisième temps, une analyse globale des résultats autour des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité et l'usage des logiciels ACV a été faite. De ces trois types de résultats, cela a permis de porter un regard critique sur les caractéristiques des artefacts numériques pour la permaingénierie. Ainsi, une conclusion plus globale de la permaingénierie a pu être formulée. Enfin, trois axes pour de futurs travaux ont été formalisés : (1) Consolider la proposition de permaingénierie via l'étude des interactions humains-machines ; (2) Proposer et tester un cadre de formation mettant en pratique les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité, (3) Conduire des expérimentations en contextes de soutenabilité forte pour y observer des situations de conception.

3.4 Conclusion du chapitre 3

Nous avons vu dans ce chapitre que les artefacts jouent des rôles primordiaux dans les travaux collaboratifs d'ingénierie. En effet, ils transmettent des informations, des représentations culturelles et sont des vecteurs de valeurs. De plus, les communautés intentionnelles autour de la transition écologique ont besoin d'artefacts véhiculant des valeurs cohérentes avec ces projets collectifs. Ainsi, des artefacts spécifiques d'ingénierie en lien avec ces valeurs sont nécessaires. Cela m'amène à proposer un nouveau type d'ingénierie pour la soutenabilité, accompagné par ces artefacts porteurs de valeurs et de pratiques cohérentes avec les objectifs de la transition écologique. Cette proposition est explicitée dans le chapitre suivant.

Vers une permaingénierie

Permaculture constitutes an ideal case to investigate organizational responses to the Anthropocene because, as a form of agricultural organization, it describes a fundamental human activity that both stands at the core of social structures and is necessary for human survival and reproduction.

[Roux-Rosier et al., 2018, p.555]

L'objectif de ce chapitre est de présenter la proposition de permaingénierie. Cette proposition consiste en un cadre théorique permettant de penser une forme d'ingénierie dans des contextes de soutenabilité forte. Ce cadre est composé de quatre caractéristiques : une éthique, un objectif, une démarche pour aborder les problèmes, une expertise. Chaque caractéristique est décrite au niveau de la pratique d'ingénierie et au niveau des interactions entre humains et artefacts numériques pour la permaingénierie. Chaque niveau fait l'objet d'une section. Ainsi, la section 4.1 est centrée sur la proposition du concept de permaingénierie, comme un concept permettant d'implémenter une éthique du *care* en ingénierie. La section 4.2 a pour objectif de définir des caractéristiques spécifiques aux artefacts numériques accompagnant les pratiques de permaingénierie. La médiatisation des caractéristiques de permaingénierie dans un artefact numérique sera présentée dans le chapitre suivant.

4.1 Permaingénierie : positionnement et définition

Cette section a pour objectif de définir le concept de permaingénierie, et est centré sur le premier niveau de ma proposition. Pour cela, deux sous-sections ont été définies. La première est centrée sur la définition des principes de la permaingénierie (section 4.1.1). La deuxième a pour objectif de distinguer différents types d'ingénierie en lien avec les problématiques environnementales, sociales et écologiques afin de positionner la permaingénierie dans le paysage de l'ingénierie pour la soutenabilité (section 4.1.2).

4.1.1 Définition des caractéristiques de la permaingénierie

Je définis la permaingénierie comme une activité d'ingénierie centrée sur un principe de collaboration entre les parties prenantes d'un processus d'ingénierie dont le but est de tendre vers la soutenabilité des systèmes socio-techniques.

Le phénomène de collaboration évoqué se définit par une relation durable entre des parties prenantes¹ autour de la conception d'un système technique et l'émergence d'une mission commune entre ces parties prenantes [Kvan, 2000]. Ainsi, les outils, méthodes et techniques de la permaingénierie doivent favoriser cette collaboration. La technologie, comprise dans ses dimensions sociales, organisationnelles et techniques agit comme un liant entre plusieurs systèmes (naturels, humains, non-humains). Ainsi, quatre caractéristiques semblent essentielles à cette collaboration en cohérence avec un paradigme de soutenabilité forte :

- Caractéristique 1 : Une attention au bien-être de l'ensemble des parties prenantes, que l'on peut relier à une éthique du *care* ;
- Caractéristique 2 : Une activité d'ingénierie qui a porte un paradigme de soutenabilité forte ;
- Caractéristique 3 : Une activité d'ingénierie qui porte une démarche socio-technique de résolution de problèmes et qui porte une attention particulière à la spécificité des milieux dans lesquels elle est mobilisée ;
- Caractéristique 4 : Une capacité à mettre en interaction différents systèmes (humains, naturels, non-humains). Cette capacité d'action est nommée expertise inter-actionnelle et s'appuie sur les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité.

Ces quatre caractéristiques ne sont pas au même niveau. La première est une éthique structurant l'ensemble de la pratique, la deuxième définit l'objectif de soutenabilité à atteindre, la troisième définit une manière d'aborder les problèmes de soutenabilité et la quatrième définit l'expertise et les compétences à développer. Cela est représenté dans la figure 4.1. La représentation des quatre caractéristiques et leurs interactions se trouve à la fin de la section, en figure 4.4.

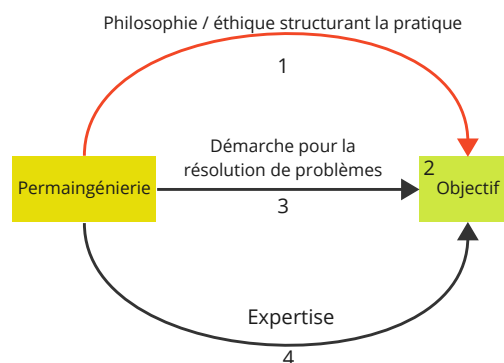


FIGURE 4.1 – Les quatre caractéristiques de la permaingénierie

Le cadre de permaingénierie est caractérisée par 4 éléments : (1) une éthique, (2) un objectif, (3) une démarche et (4) une expertise.

1. (utilisateurs finaux, fournisseurs, concepteurs, humains et non-humains impactés, etc)

Dans la suite de ce chapitre, chacune des caractéristiques est détaillée et mise en lien avec les autres. La première partie est focalisée sur la rencontre entre *care* et conception via la permaculture (caractéristique 1). La deuxième partie concerne les objectifs de soutenabilité forte en permaingénierie (caractéristique 2). La troisième partie se focalise sur la démarche socio-technique de résolution de problèmes et la mobilisation du concept de milieu (caractéristique 3). La quatrième et dernière partie aborde la question des compétences et de l'expertise du permaingénieur (caractéristique 4).

Caractéristique 1 : Le *care* et le cas particulier de la permaculture comme socle d'action pour la conception en ingénierie

Les technologies développées par les ingénieurs touchent des parties prenantes multiples, et les ingénieurs n'interagissent pas avec l'ensemble d'entre elles. C'est la raison pour laquelle les ingénieurs doivent être capables d'anticiper les effets néfastes de leurs productions sur l'ensemble des parties prenantes. Comme le montre [Hess and Fila, 2016], l'intégration de l'éthique du *care* dans des formations d'ingénierie peut aider les futurs ingénieurs à mettre en oeuvre cette éthique. Les enjeux de soutenabilité étant complexes et opérant dans le long-terme, les acteurs de l'ingénierie doivent se soucier des autres vivants sur Terre impactés par les technologies créées, tout comme les futures générations. Cette capacité à se mettre à la place d'autrui correspond au processus cognitif de l'empathie [Hess et al., 2017]. L'empathie est définie comme un concept multi-facettes et plusieurs types d'empathie existent : orienté vers soi (détresse empathique, imaginer la mise en perspective de soi), orienté vers les autres (préoccupation empathique, imaginer la prise de perspective d'autrui) [Hess and Fila, 2016]. La capacité d'empathie est à nouveau mentionnée dans la section sur la caractéristique 4 de la permaingénierie. L'empathie est liée à l'éthique du *care* [Hess et al., 2016].

L'éthique du *care* doit être considérée comme une composante essentielle de la permaingénierie. *Care* peut se traduire par soin en français. Cependant cette traduction française cache deux sens en anglais : *care* et *cure*. Dans ce manuscrit, il a été choisi de ne pas traduire le terme *care* par soin afin de ne pas confondre deux manières de comprendre ce terme : "prendre soin" (*care*) et "faire des soins" (*cure*). La définition de l'éthique du *care* est la suivante : "Tout ce que nous faisons pour maintenir, poursuivre et réparer "notre monde" afin de pouvoir y vivre aussi bien que possible. Ce monde comprend notre corps, nous-mêmes et notre environnement, que nous cherchons tous à imbriquer dans une toile complexe qui entretient la vie" [Fisher and Tronto, 1990].

Dans l'introduction de cette section, il a été affirmé que l'activité de permaingénierie est centrée sur la collaboration entre les différentes parties prenantes d'un projet d'ingénierie. Le *care* est un concept qui apparaît dans la relation entre les choses. En effet, Christine Koggel ou encore Jennifer Nedelsky ont montré que le *care* doit être reconnu comme relationnel [Koggel, 1997, Nedelsky, 2008]. Ainsi, le *care* est un concept qui s'inscrit dans les relations (entre humains, non-humains et l'ensemble des choses du monde) et est ancré dans une inter-dépendance. C'est la raison pour laquelle des auteurs comme [Toombs et al., 2015] ont réalisé des études ethnographiques pour explorer comment les individus d'une communauté sont en relation les uns avec les autres. Je vais particulièrement m'intéresser aux relations, notamment les interactions, c'est-à-dire des relations où des processus d'influence ont lieu entre les entités associées.

Dans mon approche, il s'agit de relier l'éthique du *care* à des pratiques d'ingénierie

et de conception. L'éthique du *care* peut paraître conceptuelle, abstraite et difficile à concrétiser dans des pratiques d'ingénierie. L'une des manières pour relier éthique du *care* et ingénierie semble être la permaculture. Pourquoi spécifiquement cette pratique ? La permaculture est une méthode de conception éthique. Cette méthode est focalisée sur les enjeux de soutenabilité, avec, en son centre, la philosophie du *care*. En effet, la permaculture se base sur trois principes éthiques : *care for the people*, *care for the Earth*, *fair trade*. Les principes de conception de la permaculture, au nombre de douze, sont une manière de faire vivre ces principes éthiques.

Les douze principes de conception de la permaculture sont les suivants :

1. Observer et interagir
2. Collecter et stocker l'énergie
3. Créer une production
4. Appliquer l'auto-régulation et accepter la rétroaction
5. Utiliser et valoriser les services et les ressources renouvelables
6. Ne pas produire de déchets
7. Partir des structures d'ensemble pour arriver aux détails
8. Intégrer plutôt que séparer
9. Utiliser des solutions à de petites échelles et avec patience
10. Utiliser et valoriser la diversité
11. Utiliser les interfaces et valoriser les éléments en bordure
12. Utiliser le changement et y réagir, de manière créative

Ainsi les principes de conception de la permaculture constituent un exemple de mise en oeuvre de l'éthique du *care* dans des situations de conception en ingénierie.

Également, l'activité de permaingénierie s'ancre dans une dimension globale (caractéristique 2) et locale (caractéristique 3). C'est le sujet des deux prochaines sections.

Caractéristique 2 : un objectif de soutenabilité forte

Les acteurs de la permaingénierie s'ancrent dans un paradigme de soutenabilité forte. Ainsi, il s'agit de concevoir et produire des systèmes socio-techniques qui sont en cohérence avec un espace "sûr et juste" pour l'humanité : environnementalement sûr en respectant un plafond environnemental et socialement juste en assurant un niveau de bien-être minimum pour les communautés humaines.

Ainsi, la transition écologique est comprise comme un changement culturel, tel que défini dans le chapitre 2. Cette définition est rappelée ici : "La transition écologique est comprise comme un changement du modèle culturel qui va accompagner un changement des activités socio-économiques et ainsi une diminution de l'impact environnemental des activités humaines."

"La transition écologique, comprise dans un paradigme de soutenabilité forte, nécessite un changement de régime socio-technique. Cette transition est comprise ici comme une nécessité afin d'assurer la survie de l'humanité à court terme sur l'échelle des temps géologiques. Cette transition écologique implique un changement fort sur l'ensemble des

champs de la société (culture, politique, vision des non-humains, etc), avec en son centre un impératif de sobriété."

Les problèmes de soutenabilité sont interprétés par les acteurs de la permaingénierie comme des problèmes complexes, n'ayant pas de "solution" générique mais uniquement des possibles "réponses" qui doivent être pensées en prise avec les systèmes locaux (naturels, humains). La compréhension socio-technique des problèmes d'ingénierie et la prise en compte du contexte local sont explicitées dans la prochaine section.

Caractéristique 3 : une collaboration au sein d'un *milieu*

La compréhension des problèmes d'ingénierie et l'attention portée aux spécificités des localités permet de prendre en compte toute la complexité des projets de transition en lien avec des systèmes techniques.

L'activité de permaingénierie a pour objectif l'amélioration de l'état global de la planète et a comme moyen d'y parvenir une pratique de la conception ancrée dans les interactions locales. Pour mieux comprendre cet impératif de contextualisation, il est possible de mobiliser le concept de *milieu*. L'objectif d'une activité de permaingénierie n'est pas de protéger la nature mais bien d'apprendre à vivre avec cette nature. C'est dans ce sens que [Petit and Guillaume, 2018] définissent le concept de *milieu*. En effet, un *milieu* fait référence à ce qui est au centre et autour d'un espace. *Milieu* s'oppose au terme environnement dans le sens où le *milieu* est relatif, l'environnement est absolu. Le *milieu* montre que les systèmes humains, non-humains, techniques, naturels sont inséparables les uns des autres, tandis que l'environnement est un espace généralement perçu comme extérieur aux systèmes humains. Les éléments constitutifs d'un *milieu* sont spécifiques à ce dernier et décrivent une situation physico-bio-socio-technique.

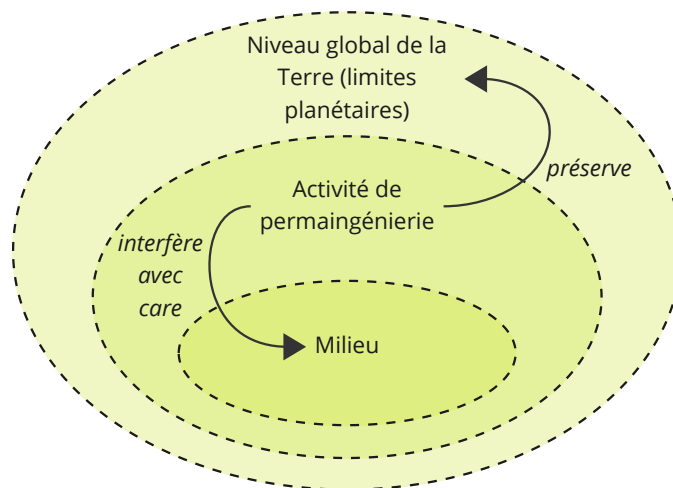


FIGURE 4.2 – Représentation des interactions entre l'activité de permaingénierie et les éléments locaux et globaux

La figure représente le lien entre le niveau local et global des activités de permaingénierie. Cette activité a un objectif de respect des limites planétaires, tout en interférant dans des milieux, avec une éthique du *care*.

Cette vision des contextes spécifiques conduit à la conception de différents types d'ar-

tefacts qui correspondent à des contextes spécifiques. Cet impératif de diversité dans la conception peut également être relié au 10ème principe de la permaculture, qui est d'"Utiliser et valoriser la diversité". Une diversité technologique ou techno-diversité semble nécessaire afin d'adapter les systèmes techniques aux *milieux*. La figure 4.2 résume la situation des activités de permaingénierie, qui interfèrent avec différents milieux, tout en gardant à l'esprit l'état global de la Terre (et l'impératif de retour dans les limites planétaires pour atténuer les effets de l'Anthropocène).

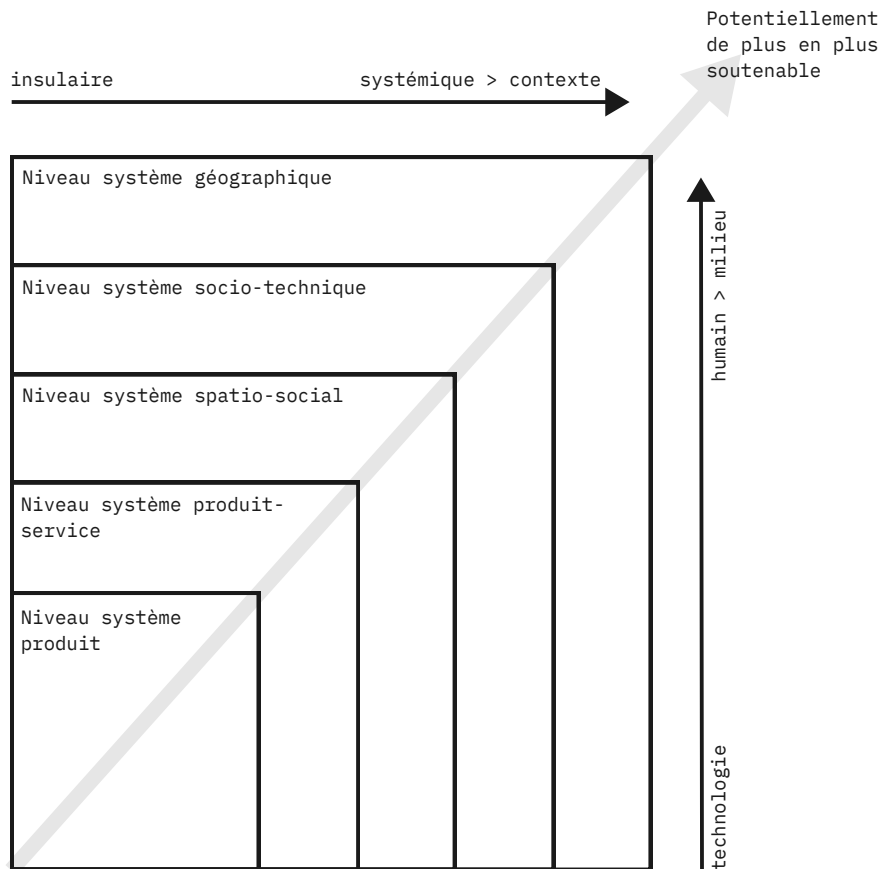


FIGURE 4.3 – L'évolution du design pour la soutenabilité (design for sustainability), adapté et traduit de [Ceschin and Gaziulusoy, 2016] et [Bratec, 2020]

La figure est composée de trois dimensions. La première dimension (axe des abscisses, en haut de la figure) va d'un niveau insulaire à un niveau systémique des systèmes. La deuxième dimension (axe des ordonnées, à droite de la figure) va d'une compréhension techno-centrée des systèmes techniques à un niveau socio-technique des systèmes techniques. La troisième dimension est le potentiel de soutenabilité d'un système technique. Plus le système se positionne en haut à droite du diagramme, plus il est potentiellement soutenable. Le niveau géographique porte une certaine forme de contextualisation, permettant de situer le système technique.

Cette vision de l'activité de conception située dans un contexte géographique est présente dans les travaux de [Bratec, 2020] où la conception pour la soutenabilité est comprise dans ses dimensions techniques, économiques, sociales, mais également géographiques. Si l'on reprend la théorie du *design for sustainability* de [Ceschin and Gaziulusoy, 2016],

et modifiée par [Bratec, 2020], plus la conception est pensée de manière systémique² et ancrée dans un milieu, plus le système socio-technique est soutenable. Cette vision est représentée sous forme de diagramme au niveau de la figure 4.3.

Les trois premières caractéristiques montrent que l'activité de permaingénierie est en lien avec un contexte global et local, agissant dans le cadre d'une éthique du *care*.

La section suivante sera centrée sur l'expertise et les compétences à développer par les acteurs de la permaingénierie.

Caractéristique 4 : Une expertise interactionnelle et des compétences au service de la collaboration

Cette section aborde les questions suivantes : de quoi un permaingénieur est-il expert ? Que fait-il ? Comment peut-il mettre en œuvre son expertise ? Quelles compétences ce praticien possède-t-il ?

Dans cette section, il s'agit d'identifier l'expertise et les compétences de praticiens de la permaingénierie. L'expertise est "le recours à une analyse compétente dans des situations contentieuses ou incertaines". La compétence est une capacité à agir dans une situation complexe. Un expert a acquis son expertise à travers une expérience. Le mot expert vient du latin *experiri* et a pour définition : celui "qui a fait ses preuves, qui a de l'expérience, qui est habile" [Calafat, 2011].

Les travaux de [Seager et al., 2012] permettent de définir quelle expertise est nécessaire dans les pratiques de permaingénierie. Le chapitre 2 a permis de rappeler que les pratiques traditionnelles de l'ingénierie sont divisées selon des domaines (mécanique, électronique, informatique, logistique, etc). Cette division mène à une spécialisation des savoir-faire. [Seager et al., 2012] caractérise cette expertise comme "compartmentée". Par opposition, une expertise interactionnelle est la capacité de comprendre un domaine d'expertise classique sans être expert de celui-ci. L'expertise interactionnelle est décrite de la manière suivante : "Grâce à cette prouesse discursive, les experts interactionnels démontrent qu'ils peuvent voir le monde du point de vue d'un spécialiste, c'est-à-dire qu'ils peuvent émettre des jugements techniques faisant autorité, faire des blagues d'initiés et poser des questions d'avocat du diable qui tournent autour d'idées généralement connues uniquement des spécialistes d'un domaine". Ainsi, cette compréhension du milieu permet au permaingénieur d'être à l'interface de plusieurs domaines. Le permaingénieur va même plus loin en amenant les différentes parties prenantes à se rencontrer, puis à collaborer. Cette expertise interactionnelle est au service de la collaboration.

Je soutiens que cette expertise doit être particulièrement développée dans les activités de permaingénierie. En effet, les praticiens doivent être en interaction avec les différentes parties prenantes, elles-mêmes porteuses de connaissances, savoirs, traditions, normes différentes. Ainsi, le permaingénieur se doit d'être le traducteur entre ces différents mondes. Cela suppose des compétences spécifiques qui peuvent être rapprochées des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité telles qu'elles sont décrites dans la littérature scientifique [Quelhas et al., 2019, UNESCO, 2017, Wiek et al., 2011].

Ces compétences sont décrites dans le tableau 4.1. Une description du lien entre chaque

2. La systémique est une manière d'étudier un phénomène en le comprenant comme un système, c'est-à-dire un ensemble complexe d'interactions.

compétence et la capacité à collaborer a été mise en place pour montrer le lien entre ces compétences et l’expertise interactionnelle. L’importance de la collaboration dans les compétences pour la soutenabilité est rappelée par [Redman and Wiek, 2021]. En effet, la collaboration est intégrée aux différentes étapes d’un projet de transition soutenable (dans la planification du projet, son implémentation et son intégration).

Table 4.1: Liste des compétences d’ingénierie pour la soutenabilité, leur description [Quelhas et al., 2019] et le lien avec les aspects collaboratifs et une expertise interactionnelle

Compétence	Description [Quelhas et al., 2019]	Lien avec la collaboration et l’expertise interactionnelle
(1) Travail dans un groupe interdisciplinaire	Capacité à respecter et comprendre les opinions, besoins, comportements et actions des autres composantes d’une équipe (empathie).	Le permaingénieur est en lien avec différents experts et non-experts d’un projet et doit tisser des liens entre ces parties prenantes.
(2) Esprit critique	Capacité à questionner les standards, pratiques et opinions. La personne est capable de réfléchir à ses propres valeurs, perceptions et actions et prend position par rapport aux discours sur la transition écologique.	Le permaingénieur doit comprendre la posture de ses interlocuteurs : le jargon utilisé, les hypothèses de la communauté de ces interlocuteurs et la manière la plus pertinente d’exprimer des doutes / interrogations sur leurs standards afin que la critique soit porteuse de transition.
(3) Compétence normative	Capacité à comprendre et à réfléchir aux normes et aux valeurs qui fondent les actions des personnes, à négocier les valeurs, les principes, les objectifs et les buts de la soutenabilité, dans un contexte de conflits d’intérêts, de concessions et de contradictions.	Le permaingénieur comprend différents points de vue et fait émerger des points d’accords entre les avis divergents.
(4) Résoudre des problèmes	Capacité à résoudre des problèmes complexes de soutenabilité et à développer des options de solutions viables, inclusives et équitables qui favorisent la transition vers la soutenabilité des systèmes socio-techniques.	Le permaingénieur interfère dans un <i>milieu</i> avec les parties prenantes d’un projet.
(5) Pensée systémique	Capacité d’identifier et de comprendre les interactions entre les systèmes et les personnes dans les contextes sociaux, culturels, environnementaux, commerciaux, juridiques et politiques où ils opèrent.	Le permaingénieur se doit d’avoir des connaissances spécifiques sur les impacts environnementaux d’un système technique tout au long de son cycle de vie. Par exemple, pour la réalisation d’une ACV, le permaingénieur ne doit pas être expert des systèmes industriels mais avoir assez de connaissances pour pouvoir échanger avec des experts.
(6) Connaissance de soi	Capacité à réfléchir à son propre rôle dans la communauté locale et la société, à évaluer en permanence ses propres actions et à gérer ses propres sentiments et désirs.	Pas de lien direct avec l’expertise interactionnelle et la collaboration. Cependant, compétence nécessaire pour l’esprit critique (connaître ses propres valeurs, perceptions et actions).

Continued on next page

Table 4.1: Liste des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité, leur description [Quelhas et al., 2019] et le lien avec les aspects collaboratifs et une expertise interactionnelle (Continued)

Compétence	Description [Quelhas et al., 2019]	Lien avec la collaboration et l'expertise interactionnelle
(7) Contextualisation et vision du futur (anticipation)	Capacité à comprendre et à évaluer plusieurs futurs, à appliquer le principe de précaution, à évaluer les conséquences, les risques et les changements. La contextualisation implique la sensibilité de l'ingénieur pour comprendre pourquoi certaines connaissances et capacités sont nécessaires pour visualiser les solutions et les conséquences dans un contexte plus large.	Le permaingénieur se doit d'avoir des connaissances spécifiques sur les conséquences de la production de systèmes techniques.
(8) Compétence stratégique	Capacité à développer et à mettre en œuvre collectivement des actions innovantes pour promouvoir la soutenabilité au niveau local et dans des contextes plus larges.	Le permaingénieur doit collaborer avec les parties prenantes en vue d'une action concrète, entre différents membres d'un projet, potentiellement avec des savoirs-faires et normes différents.

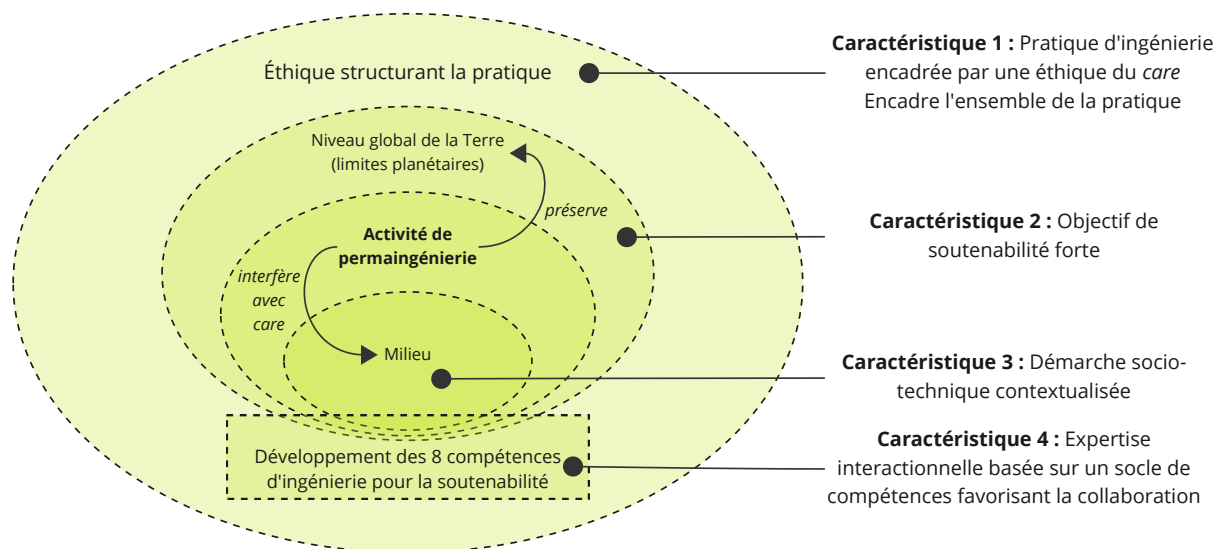


FIGURE 4.4 – Schéma global représentant les quatre caractéristiques de la permaingénierie

La figure représente les interactions entre les quatre caractéristiques de la permaingénierie. La caractéristique 1 fait référence au cadre d'éthique de l'action. La caractéristique 2 représente l'objectif de soutenabilité forte, tandis que la caractéristique 3 désigne la démarche socio-technique qui doit être focalisée sur l'adéquation d'un système technique aux systèmes (naturels, sociaux, techniques) situés déjà en place. La caractéristique 4 rappelle que l'expertise interactionnelle et les 8 compétences d'ingénierie pour la soutenabilité sont développés dans la pratique des 3 précédentes caractéristiques.

Conclusion : La permaingénierie s’ancre dans une éthique du *care*. Sa pratique est liée au contexte local (milieu), tout en considérant les problématiques globales (limites planétaires). Ces deux caractéristiques (éthique et lien entre global et local) impliquent que la pratique de permaingénierie évolue dans un contexte local, en interaction avec les parties prenantes directes et indirectes d’un projet de conception. Ainsi, l’expertise que les praticiens développent est interactionnelle et se base sur une série de compétences telles que décrites dans le tableau 4.1. Cette expertise interactionnelle est mise au service de la collaboration entre les parties prenantes, permettant de structurer les démarches de permaingénierie. La permaingénierie se situe dans la famille des sciences de l’ingénierie soutenable. Dans cette famille, la soutenabilité est comprise comme un problème complexe et socio-technique.

Cette section a permis de comprendre quels étaient les principes éthiques de la pratique de permaingénierie, les principes de conception ainsi que les compétences et le type d’expertise nécessaires. Je vais m’intéresser aux différents types d’ingénierie pour la soutenabilité afin de montrer en quoi notre proposition diffère des autres types d’ingénierie soutenables identifiés dans la littérature.

4.1.2 Le paysage de l’ingénierie pour la soutenabilité

L’objectif de cette section est de présenter le paysage de l’ingénierie pour la soutenabilité. Cela permet de montrer dans quelle mesure ma proposition de permaingénierie s’insère dans ce paysage composite. Ce positionnement est d’autant plus important que la soutenabilité est un concept contesté [Gallie, 2019]. Sa compréhension diffère en fonction des auteurs et des contextes. Il s’agit de voir quelles sont les différentes familles d’ingénierie et leur compréhension respective de la soutenabilité. La conclusion de la section porte sur l’exploration des pratiques d’ingénierie dans des contextes de soutenabilité forte.

Un cadre pour l’ingénierie en lien avec la soutenabilité

[Seager et al., 2012] distingue trois grandes familles d’ingénierie en lien avec la soutenabilité : l’ingénierie "business-as-usual", l’ingénierie des systèmes et la science de l’ingénierie soutenable. Cette structuration permet de positionner la proposition de permaingénierie dans le paysage de l’ingénierie pour la soutenabilité. Les trois familles de l’ingénierie sont présentées dans le tableau 4.2. Certaines familles comprennent des domaines d’ingénierie spécifiques que je présenterai également (par exemple l’ingénierie avec des contraintes écologiques, l’ingénierie soutenable).

La première famille est appelée "business as usual", son objectif est de reprendre la pratique "normale" de la recherche et du développement dans le "but de rendre le monde meilleur et, par conséquent, pertinent pour la soutenabilité" [Seager et al., 2012, p.4]. Cette perspective ignore les problématiques environnementales et sociales et engendre des problématiques éthiques importantes [Borgmann, 1987, Seager et al., 2012]. Ainsi, cette famille ne s’intègre pas dans les enjeux écologiques et n’est pas considérée dans le paysage de l’ingénierie pour la soutenabilité. Aucun domaine en particulier n’est décrit par [Seager et al., 2012].

La deuxième famille est nommée "ingénierie des systèmes" et est composée de deux sous domaines : "l'ingénierie intégrant des contraintes écologiques" et "l'ingénierie soutenable".

- L'ingénierie intégrant des contraintes écologiques : "Dans cette approche, les systèmes d'ingénierie sont généralement optimisés pour des objectifs traditionnels, tels que la minimisation des coûts ou la maximisation du taux de rendement, mais dans des conditions plus contraignantes que par le passé." [Seager et al., 2012]
- L'ingénierie soutenable : "Dans cette approche, la qualité environnementale et les objectifs sociaux ne sont pas de simples contraintes à respecter. Ils sont considérés comme des objectifs de conception à part entière qui, en fin de compte, nécessitent une évaluation des compromis les uns par rapport aux autres et par rapport au coût." [Seager et al., 2012]

La troisième famille est caractérisée par une approche "proactive" de l'écologie et est définie par l'affirmation suivante : "certains secteurs scientifiques nécessitent une réorientation radicale afin de relever les défis imposés par les problèmes de soutenabilité". Dans cette optique, le développement technologique s'insère dans le contexte d'un changement radical de la société (changement de normes, d'attitudes, de pratiques, etc.). Dans cette perspective, la soutenabilité est comprise comme un problème complexe. Dans cette famille, aucun domaine en particulier n'est spécifié par [Seager et al., 2012].

TABLE 4.2 – Orientations des familles d'ingénierie envers la soutenabilité d'après [Seager et al., 2012]

Familles d'ingénierie et domaines	Focus	Culture d'expertise et d'éthique	Approche de la complexité	Approche des opinions contradictoires
<i>Ingénierie business-as-usual (approche optimiste de la technologie)</i>				
	Créer de nouvelles choses, de nouvelles ressources. Ignorer l'échelle et l'efficacité	Profondeur dans une seule discipline. Éthique professionnelle.	Simplification et réduction	Défense de l'ethos techno-industriel
<i>Ingénierie des systèmes (approche pragmatique de la technologie)</i>				
Ingénierie avec des contraintes écologiques	Optimisation des coûts d'une technologie mature. Ignore l'échelle.	Équipe pluridisciplinaire compartimentée. Éthique sociale.	Optimisation du rapport coût-bénéfice et efficacité	Litiges régulation
Ingénierie soutenable	Optimisation pour une triple performance. Ne tient pas compte de l'échelle.	Équipe pluridisciplinaire compartimentée. Éthique sociale.	Minimisation du risque	Participation structurée
<i>Science de l'ingénierie soutenable (approche sceptique de la technologie)</i>				
	La soutenabilité en tant que problème complexe.	Expertise inter-ationnelle. Éthique macro.	Anticipation, adaptation et résilience.	Coopération, délibération.

La pluridisciplinarité, terme employé par Seager dans son tableau, est le fait qu'une

équipe composée d'au moins 2 disciplines différentes s'organise autour de problèmes communs. Les frontières disciplinaires ne sont généralement pas franchies, mais les activités disciplinaires sont plutôt concrétisées en parallèle. Ce travail n'empêche cependant pas le partage d'informations entre les partenaires du projet. Il est à noter que les participants cadrent les problématiques de recherche par rapport à leur champ disciplinaire [Rice, 2013].

Le fait que certains domaines d'ingénierie ne se préoccupent pas des facteurs d'échelles signifie que les effets de 2e et de 3e ordre (si l'on reprend la structuration de [Berkhout and Hertin, 2004] et [Hilty and Aebischer, 2015] présentée au chapitre 3) ne sont pas pris en compte. Seulement les effets unitaires au niveau du produit sont pris en compte.

Les trois familles présentées dans le tableau 4.2 sont différentes dans leur approche de la soutenabilité et dans leur compréhension du rôle de la technologie dans les problèmes écologiques. La section suivante se focalise sur les recoupements possibles entre ces familles et dans quelle mesure la soutenabilité forte est adressée.

Des domaines présents dans plusieurs familles d'ingénierie pour la soutenabilité ?

Le terme "ingénierie soutenable" est flou dans la littérature scientifique. En effet, [Gagnon et al., 2012] montrent que la compréhension de ce terme diffère selon :

- La structure du processus de conception ;
- La portée des questions de soutenabilité prises en compte ;
- La pertinence des indicateurs qui guident la conception ;
- La précision des outils utilisés pour évaluer les indicateurs ;
- Les améliorations potentielles attendues des alternatives évaluées par rapport aux solutions dites "conventionnelles" ;
- L'approche de la prise de décision.

Ainsi, selon les critères de [Gagnon et al., 2012], le terme "ingénierie soutenable" peut être positionné dans la famille "ingénierie des systèmes" ou "science de l'ingénierie soutenable".

Cette problématique de clarté dans la définition des concepts est également présente avec le concept "ingénierie écologique" tel que défini par [Mitsch, 2012]. En effet, Mitsch décrit un spectre de lumière pour montrer l'ensemble des variantes de l'ingénierie écologique (cf figure 4.5). Des critères sont définis pour répartir les pratiques de l'ingénierie écologique, notamment :

- "Potentiel de soutenabilité" : le niveau de potentiel soutenable d'une pratique d'ingénierie écologique ;
- "Auto-organisation dans la conception" : s'appuyer sur l'auto-organisation dans la conception des écosystèmes. Le *self-design* est le fait de laisser la nature prendre part au processus de conception (plus ou autant que les humains dans ce processus) ;
- "Niveau d'intervention humaine" : niveau d'intervention humaine dans le processus de conception.

Ce qui est intéressant c'est que les pratiques de l'ingénierie écologique se situent à différents niveaux sur le spectre et une agrégation de plusieurs de ces pratiques est possible

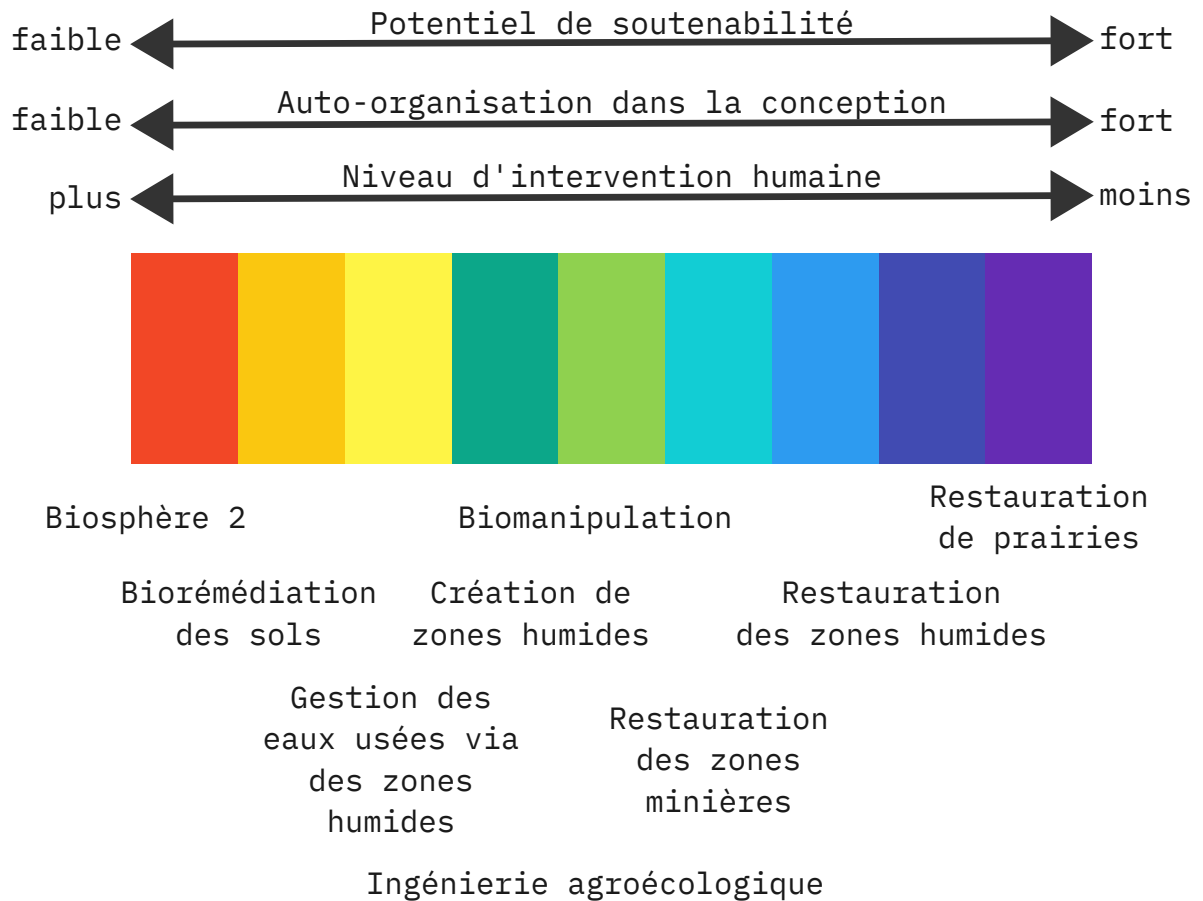


FIGURE 4.5 – Répartition de différentes activités d'ingénierie écologique en fonction de différents critères (intervention humaine, auto-gestion de l'éco-système et potentiel de soutenabilité), adapté et traduit de [Mitsch, 2012].

La figure est composée d'un spectre de lumière central qui représente un gradient. À gauche, les activités ont un potentiel de soutenabilité plus faible, une auto-organisation plus faible et un niveau d'intervention humaine plus fort. À droite, le potentiel de soutenabilité est plus fort, l'auto-organisation est plus forte et le niveau d'intervention humaine est faible. Ces niveaux sont décrits au-dessus du spectre de lumière. En dessous du spectre, des activités (liste non-exhaustive) des activités d'une ingénierie écologique sont positionnées le long du gradient.

dans une activité d'ingénierie écologique. Dans la prochaine section, le spectre de Mitsch va être utilisé et modifié pour représenter les différentes pratiques d'ingénierie issues des familles de [Seager et al., 2012]. D'autres domaines issus de la littérature vont être ajoutés pour définir une vision plus complète du paysage de l'ingénierie pour la soutenabilité. C'est le sujet de la prochaine section.

Une structuration plus complexe

Il semble que les termes d'ingénierie écologique et d'ingénierie soutenable, comprise dans un sens large et non dans le sens de Seager, puissent parfois être utilisés dans des contextes de soutenabilité forte. Ainsi, il semble que les frontières entre les différentes familles soient moins strictes qu'elles n'y paraissent dans un premier temps chez [Seager et al., 2012].

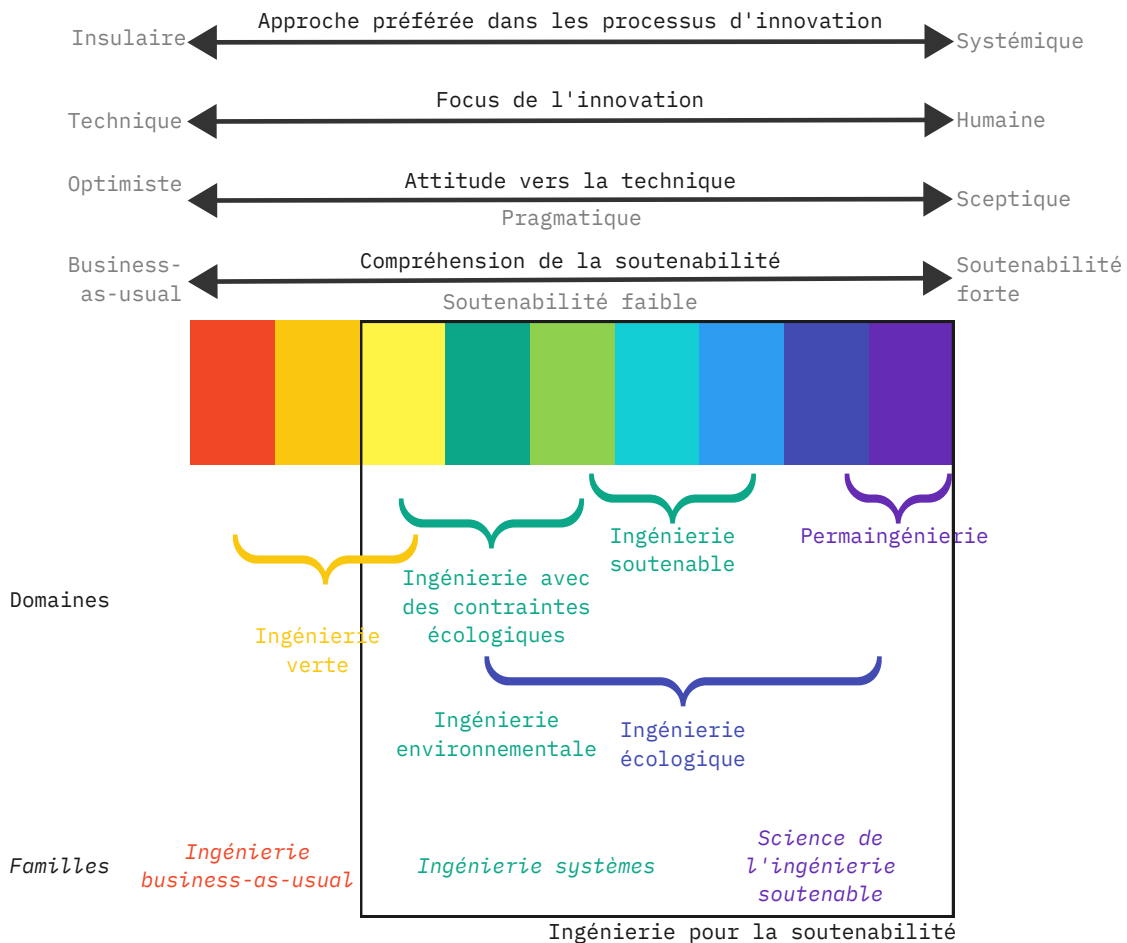


FIGURE 4.6 – Répartition des familles d'ingénierie selon un spectre large de compréhension de la soutenabilité

Le spectre de lumière est repris dans cette figure. Au dessus du spectre, la compréhension de la soutenabilité varie allant à gauche d'une négation des enjeux de soutenabilité à droite vers une compréhension forte de la soutenabilité. En dessous du spectre, différentes familles de l'ingénierie sont réparties. Ces familles sont en partie reprises de celles définies par [Seager et al., 2012].

Dans la figure 4.6, je propose une représentation des familles d'ingénierie, permettant à certains domaines d'ingénierie de se retrouver à la frontière entre plusieurs familles.

Par cette représentation, il est possible de voir l'ambiguïté de certains positionnements. Différents types d'ingénierie connus (ingénierie verte, environnementale, écologique) et la proposition de permaingénierie, ont été positionnés sur ce spectre. Les définitions des différentes pratiques d'ingénierie sont les suivantes :

- Ingénierie verte : la conception, la commercialisation et l'utilisation de procédés et produits qui sont faisables et économiques tandis qu'ils permettent une minimisation de la pollution et des risques pour la santé humaine et l'environnement [Kirchhoff, 2003] ;
- Ingénierie environnementale : profession où la connaissance des mathématiques et des sciences naturelles est appliquée avec jugement pour développer les moyens d'utiliser, de manière économique, les matériaux et les forces de la nature au profit de l'humanité [Alha et al., 2000] ;
- Ingénierie soutenable : développement de solutions avec un haut niveau de performance dans les trois piliers du développement durable, simultanément [Gagnon et al., 2009] ;
- Ingénierie écologique : la conception d'écosystèmes durables qui intègrent la société humaine avec son environnement naturel pour le bénéfice des deux [Mitsch, 1993].

Je soutiens que l'ingénierie peine à évoluer dans des pratiques de soutenabilité forte et être porteuse de changements structurants. Une des raisons est le flou des définitions, notamment le terme d'"ingénierie soutenable". Ainsi, j'ai souhaité définir les contours d'une pratique d'ingénierie explicitement pour des contextes de soutenabilité forte.

Conclusion : Il existe différentes familles d'ingénierie pour la soutenabilité, chacune composée de plusieurs domaines dont le champ varie en fonction de la compréhension de la soutenabilité. Il a été choisi d'explicitier les différentes formes d'ingénierie en fonction de leur compréhension de la soutenabilité et de positionner une nouvelle pratique d'ingénierie du côté de la soutenabilité forte, nommée "permaingénierie". Cette permaingénierie se veut en cohérence avec les valeurs de la transition écologique telle que décrite dans le chapitre 2.

J'ai expliqué les principes fondamentaux de la permaingénierie et dans quelle mesure ces principes s'ancrent dans un objectif de soutenabilité forte, par différenciation avec d'autres types d'ingénierie (soutenable, avec des contraintes écologiques). Le paysage de l'ingénierie pour la soutenabilité et les principes de permaingénierie sont également présentés dans [Grimal et al., 2023b]. Il est à présent opportun d'étudier comment cette permaingénierie peut s'appliquer. C'est la raison pour laquelle la section suivante est focalisée sur le deuxième niveau de la proposition : les artefacts numériques pour la permaingénierie. La question posée dans la prochaine section est : *quels sont les outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ?*

4.2 L'informatique en tant qu'outil vecteur de changement culturel vers la permaingénierie : définition des caractéristiques

Du cadre conceptuel décrit dans la section précédente, il est possible de conclure que la permaingénierie, au vu de ses caractéristiques spécifiques, nécessite un changement au niveau des outils et méthodes d'ingénierie. Ce changement d'outils et méthodes assure à l'ingénierie une pratique en cohérence avec les 12 principes de la permaculture. La conception d'artefacts doit donc être située.

Cette section a pour objectif de proposer des caractéristiques de méthodes et outils permettant de mettre en œuvre les principes de la permaingénierie dans des artefacts numériques. Pour cela, les 4 caractéristiques de la permaingénierie ont été reprises et sont appliquées aux artefacts numériques ainsi qu'aux interactions entre ces artefacts et les praticiens de la permaingénierie. Il s'agit donc de montrer comment ces artefacts :

- Médiatisent l'éthique du *care* ;
- Sont en cohérence avec des contextes de soutenabilité forte ;
- Médiatisent le concept de milieu et donc s'adaptent aux contextes ;
- Soutiennent l'expertise interactionnelle de leurs usagers.

Ces caractéristiques sont détaillées dans les trois sections suivantes. La première section est focalisée sur l'éthique du *care* et comment les artefacts numériques peuvent être en lien avec cette éthique. Cette section permet également de montrer comment une interaction soutenable répond aux enjeux écologiques locaux et globaux. La deuxième section sert à montrer comment les interactions humains-machines (IHM) peuvent être spécifiques à chaque contexte. Il s'agit d'identifier des caractéristiques précises pour les IHM soutenables en ingénierie. Enfin, la troisième section permet de montrer dans quelle mesure des artefacts numériques peuvent stimuler l'expertise interactionnelle et les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité.

4.2.1 Caractéristiques 1 et 2 : éthique du *care* pour la soutenabilité forte dans les interactions humains-machines

Il a été vu dans des sections précédentes que l'éthique du *care* peut se matérialiser dans la conception d'artefacts (dont numériques) et d'interactions humains-technologies. En effet, l'éthique du *care* se veut relationnelle et souhaite dépasser le "fonctionnalisme anthropocentrique" c'est-à-dire "la poursuite de l'efficacité et une appropriation des ressources du monde centrée sur l'humain" [Bardzell et al., 2021]. Ainsi, le fonctionnalisme anthropocentrique, caractéristique de la culture occidentale, a introduit des relations d'exploitation à trois niveaux : (1) entre les humains, (2) entre les humains et les non-humains et (3) entre les humains et les ressources terrestres. Ainsi, les relations d'interdépendances, de collaboration et réciprocité sont mises à mal.

L'éthique du *care* en lien avec les interactions humains-machines et en prenant en compte les limites planétaires se retrouve dans des écrits scientifiques, notamment sur des cas d'études autour de l'agriculture. [Liu et al., 2018, Liu et al., 2019a, Liu et al., 2019b] montrent dans quelle mesure des artefacts numériques peuvent être intégrés à une

pratique de l'agriculture en cohérence avec les principes de la permaculture. Ainsi, les artefacts peuvent accompagner les principes du *care*.

La position de Liu montre qu'il est nécessaire de sortir d'une pratique non-soutenable de l'agriculture (monoculture) et que c'est seulement hors de ce cadre que le numérique peut être repensé. Ainsi, [Streed et al., 2021] montrent que l'agriculture de précision, c'est-à-dire une agriculture se basant sur les technologies numériques pour diminuer et mieux contrôler la quantité d'intrants chimiques dans les sols, pose des problématiques éthiques et environnementales, avec des effets rebonds : mise en place d'un système informatique complexe, focalisation sur l'optimisation des intrants chimiques et la minimisation des pertes, enjeux autour des données, impacts environnementaux (quantités d'énergies requises, fin de vie des équipements informatiques). [Streed et al., 2021] concluent sur le fait que l'agriculture de précision, supportée par des équipements informatiques lourds et complexes "intègrent des systèmes de valeurs discutables et risquent d'aggraver les charges sociales disparates de l'agriculture industrielle, de l'informatique et des secteurs industriels existants" [Streed et al., 2021, p.8].

L'intégration de l'éthique du *care* dans les artefacts numériques d'ingénierie pour la soutenabilité est possible. Grâce à l'exemple présenté dans le paragraphe précédent, il est possible d'affirmer que les artefacts numériques d'ingénierie doivent être appliqués à des contextes en cohérence avec l'éthique du *care* et dans une logique écologique de mise en place d'un espace sûr et juste pour l'humanité, tel que défini dans le chapitre 2. Pour cela, ces outils doivent s'ancrer dans des milieux. C'est ce qui va être abordé dans la section suivante.

4.2.2 Caractéristique 3 : des artefacts numériques d'ingénierie qui s'adaptent aux contextes

Dans ce manuscrit, il a été vu que les contextes de soutenabilité forte étaient différents d'autres contextes. Une littérature scientifique autour de communautés intentionnelles écologiques montrent dans quelle mesure ces communautés ont besoins de systèmes techniques adaptés à leurs spécificités. En effet, Norton et ses collègues montrent que la mise en place d'une communauté de permaculture nécessite des systèmes informatiques spécifiques pour accompagner le développement de ces communautés. Ce travail s'appuie sur les travaux préliminaires de [Norton et al., 2019b]. Plus précisément, [Norton et al., 2019a] décrivent comment un système de distribution de ressources (en mettant l'accent sur la connaissance des plantes pour une pratique de permaculture commune dans une communauté) a été conçu pour s'adapter aux besoins, aux valeurs et au fonctionnement des membres de la communauté étudiée.

Ces auteurs ont défini des caractéristiques spécifiques aux artefacts numériques et aux types d'interactions :

- Développer un système convivial : trouver le bon niveau de complexité dans les connaissances offertes par le système d'information (les connaissances complexes, par exemple sur le monde végétal, sont adaptées au niveau de chaque utilisateur) ;
- Développer un système de collaboration : encourager la collaboration au sein de la communauté : assurer la collaboration entre les jardins individuels pour assurer une cohérence au niveau d'un territoire donné (voisins déjà en contact et voisins non encore investis dans une démarche) ;

- Développer un système d'apprentissage : offrir un espace pour la participation et l'éducation de la communauté ;
- Développer un système adapté au contexte d'usage : offrir un artefact qui peut être modifié par les usagers pour une meilleure appropriation des concepts et un usage plus aisé. Cette caractéristique peut être reliée à la notion de bricolage (évoquée plus haut).

Chaque caractéristique peut être perçue au niveau de l'interaction humain - machine et au niveau de l'artefact lui-même.

Par rapport à la dernière caractéristique "Développer un système adapté au contexte d'usage", je soutiens que chaque artefact technique d'ingénierie doit pouvoir être manipulé et bricolé pour être adapté au contexte. Le bricolage est défini par : "la faculté de réaliser en permanence un mélange de contenus d'origines très diverses. Le caractère manipulable des contenus numériques permet en effet des assemblages et des montages selon des logiques empruntées aux différents médias. La production expressive des générations du millénaire sur tous les réseaux sociaux en constitue un exemple frappant" [Monnoyer-Smith, 2017].

Ainsi, même si ces caractéristiques peuvent être présentées de manière générale, leur application impose une spécification de l'artefact numérique d'ingénierie aux contextes. En effet, chaque communauté étant différente, la convivialité du système sera comprise différemment. De même, une communauté change en fonction du temps et un système numérique peut convenir au lancement de la communauté et être amené à évoluer dix ans après car les connaissances de la communauté ont évolué.

Cette section a permis d'identifier des caractéristiques techniques liées aux artefacts numériques d'ingénierie. L'objectif de la prochaine section est de montrer comment les outils numériques peuvent être mis au service de la collaboration dans des pratiques d'ingénierie pour la soutenabilité.

4.2.3 Caractéristique 4 : des artefacts numériques d'ingénierie renforçant les collaborations

L'expertise interactionnelle nécessite de monter en compétence dans plusieurs domaines et d'avoir une forte capacité à collaborer avec des personnes ayant des langues, des normes et des pratiques différentes [Collins et al., 2007]. La conception participative met en oeuvre cette expertise interactionnelle en pratique car cette dynamique met en situation de conception différents types de parties prenantes (directes, indirectes, avec des expertises et des normes différentes). Comme l'explique [Light and Akama, 2014, p.1], la conception participative a été développée avec "la conviction que les personnes concernées par l'introduction d'une nouvelle technologie devraient avoir leur mot à dire dans le processus de conception et la prise de décision conjointe". La capacité à faire preuve d'empathie est cruciale dans ces situations car cette activité consiste à comprendre un problème commun sous plusieurs angles. Ces situations de conception participatives mettent en oeuvre l'ensemble des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité définies par [Quelhas et al., 2019]. Il a été vu dans la section précédente que ces compétences sont liées à l'expertise interactionnelle, aux situations de collaboration et participent au développement de l'empathie.

[Hansen, 2020] décrit une situation de co-conception où un réseau social est développé pour et par une communauté éco-responsable. Dans l'expérience décrite, il est possible de

voir que l'artefact numérique accompagnant la communauté est conçu avec les membres de la communauté. De plus, les auteurs ont identifié des principes pour la conception d'artefacts pour cette communauté tels que :

- 1) les données suivent l'action, "c'est-à-dire que les données seront générées automatiquement par l'interaction avec des matériaux, des outils et des installations physiques" [Hansen, 2020, p.2] ;
- L'information suit la communauté (et non la communauté qui suit l'action) "c'est-à-dire que l'interprétation des données générées par les membres de la communauté n'est pas liée à des individus, mais à une action, des conditions, des ressources et des installations partagées" [Hansen, 2020, p.2].

Ainsi, les informations ne sont pas liées aux individus mais bien aux actions réelles réalisées.

Cette section a permis d'identifier les principales caractéristiques des artefacts numériques de la permaingénierie. Sur la base de ces éléments, j'ai médiatisé ces caractéristiques dans une proposition technique afin de pouvoir les tester dans des situations de conception.

Conclusion : Ce chapitre a permis de montrer que les interactions humains-machines peuvent soutenir des activités de permaingénierie et quelles formes ces interactions peuvent prendre. Quelques caractéristiques ont été définies : le contexte de l'interaction, la convivialité de l'artefact, la collaboration et l'apprentissage induit par l'usage de l'artefact, l'adaptation de l'artefact au contexte d'usage, la capacité à ne pas empêcher l'action. Le bilan des caractéristiques des outils numériques :

1. Caractéristique 1 : Un artefact qui médiatise l'éthique du *care*
 - (a) Un système qui questionne son domaine d'application (est-ce que cela a du sens de réaliser une analyse environnementale pour ce que l'on est en train de faire)
 - (b) Un système qui ne bloque pas l'action
2. Caractéristique 2 : Un objectif de soutenabilité forte
 - (a) Un système qui fait le lien entre les activités locales et les impacts environnementaux
3. Caractéristique 3 : Une activité d'ingénierie qui devient spécifique aux contextes locaux
 - (a) Un système convivial
 - (b) Un système collaboratif
 - (c) Un système pour l'apprentissage
 - (d) Un système modifiable
4. Caractéristique 4 : Une expertise qui se veut être positionnée sur la mise en relation
 - (a) Un système proposant une conception participative
 - (b) Un système à la frontière de plusieurs expertises

La médiatisation des caractéristiques techniques dans un prototype réalisé va être présentée dans le prochain chapitre.

4.3 Conclusion du chapitre 4

Afin de mettre en oeuvre et expérimenter une logique de permaingénierie, les principes proposés ont été déployés dans un artefact numérique supportant des activités de conception. Une activité de conception pour la soutenabilité a été choisie car cette pratique met en oeuvre des interactions entre des acteurs de l'ingénierie autour des enjeux de soutenabilité. Plus précisément, une étape précise de cette activité de conception a été choisie : l'évaluation des impacts environnementaux de systèmes techniques. Parmi les méthodes d'évaluation environnementales, la méthode d'Analyse de cycle de vie (ACV) a été choisie car c'est une méthode d'analyse environnementale robuste, supportée par une norme et des outils. Le choix de la méthode ACV est davantage détaillé dans le chapitre suivant. Accompagnant cette justification, je présenterai comment j'ai médiatisé les caractéristiques de la permaingénierie dans un logiciel. Mon objectif est de comprendre dans quelle mesure cette première médiatisation dans un logiciel correspond aux valeurs, pratiques et méthodes de la permaingénierie.

Médiatisation de la permaingénierie : zoom sur ACVnum

Afin d'expérimenter une logique de permaingénierie, j'ai médiatisé les quatre principes du cadre théorique présenté dans le chapitre précédent dans un logiciel (prototype) supportant des activités de conception. L'objectif de ce chapitre est triple : expliquer le choix d'une activité d'ingénierie spécifique, identifier les limites de logiciels experts d'ACV et justifier les choix de conception du prototype, appelé prototype ACVnum. Pour cela, le chapitre est structuré en deux temps. Dans un premier temps, je vais expliquer les raisons qui m'ont poussé à choisir un outil logiciel d'analyse de cycle (ACV) pour réaliser mes expérimentations. Cette section sera également l'occasion de présenter un logiciel d'ACV, afin d'identifier les limites de l'usage des logiciels d'ACV. Dans un deuxième temps, il s'agira de se focaliser sur le prototype ACVnum : montrer les liens entre le prototype et le modèle de permaingénierie, les choix de conception réalisés et une description précise de son usage.

Il est important de noter que ce chapitre a été conçu pour être accessible aux personnes n'ayant aucune notion en ACV. C'est la raison pour laquelle la méthode ACV sera présentée, ainsi que certains termes techniques pouvant paraître basiques en ACV.

5.1 Outil logiciel au service de l'analyse environnementale

Cette section permet de justifier le choix de l'analyse de cycle de vie comme cas d'étude. Elle est donc structurée en deux sections : une sur le choix de la méthode ACV et l'autre sur les outils logiciels experts supports à la démarche ACV.

5.1.1 Choix de l'analyse de cycle de vie

Cette section a pour objectif de présenter les raisons qui m'ont poussées à choisir la méthode ACV pour mes expérimentations. Dans une première partie, l'importance de l'analyse environnementale dans un processus de conception sera détaillée. Dans une deuxième section, l'ACV est présentée (en tant que méthode) afin d'assurer au lecteur novice en ACV une compréhension de ma démarche. Dans une troisième section, un zoom est réalisé

sur les problématiques de participation des parties prenantes dans les démarches ACV. Ce zoom permet de montrer que l'ACV est compatible avec un processus collaboratif cohérent avec les caractéristiques de la permaingénierie. Dans une quatrième section, je résume les raisons qui m'ont poussées à me focaliser sur les logiciels d'ACV comme un cas d'étude pour tester la proposition de permaingénierie.

Analyse environnementale dans la conception

Comme présenté dans le chapitre 3, l'activité de conception implique des artefacts et nécessite une collaboration entre diverses parties prenantes. Afin de concevoir de manière plus soutenable, différentes méthodes ont été développées pour accompagner les choix de conception, l'analyse de cycle de vie étant l'une d'entre elles. Les choix de conception sont basés sur des connaissances autour de l'impact environnemental des systèmes techniques étudiés. L'analyse environnementale permet de connaître l'impact environnemental de différents systèmes techniques, de comparer ces impacts et accompagner les prises de décision.

Une analyse environnementale peut être réalisée à plusieurs moments du processus de conception. J'ai choisi de l'aborder lorsque cette analyse est réalisée en amont de la conception. Il existe plusieurs manières d'évaluer des impacts environnementaux : de manière monocritère (réaliser un bilan carbone par exemple) ou pluricritères (ACV, ACV simplifiée). Parmi les méthodes d'évaluation environnementales, je me suis concentrée sur la méthode d'Analyse de cycle de vie (ACV) car c'est une méthode d'analyse environnementale robuste, supportée par une norme et des outils logiciels. Afin de présenter le prototype ACVnum de manière claire, je vais d'abord succinctement présenter dans la prochaine section ce qu'est la démarche ACV.

Méthode ACV

L'analyse de cycle de vie est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit ou d'un service. Cette méthode suit les normes ISO14000 et ISO14040 [Finkbeiner et al., 2006]. La démarche ACV est composée de 4 étapes principales, réalisées de manière itérative : (1) la définition des objectifs et du champ de l'étude, (2) l'inventaire de cycle de vie, (3) l'évaluation des impacts, (4) l'interprétation. Une dernière étape (applications directes) permet de voir dans quelle mesure les résultats obtenus vont impacter le monde réel (le système de production, le business-model de l'entreprise, etc). Ces étapes sont représentées dans la figure 5.1. Dans la suite du chapitre, les étapes d'une démarche ACV présentes dans les logiciels d'ACV seront identifiées sur ce schéma.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale, qui est aujourd'hui soutenue par des outils de calcul et des bases de données [Rice et al., 1997]. L'ACV a été créée grâce à des collaborations entre des chercheurs et des industries [Hunt et al., 1996] et est maintenant considérée comme une méthode robuste d'évaluation environnementale. Les outils d'ACV sont des outils d'experts et ne sont pas faciles à obtenir (à cause de leur prix), ni à utiliser (à cause de leur technicité). Plusieurs raisons peuvent conduire à la réalisation d'une analyse de cycle de vie : (1) la comparaison de systèmes techniques actuels ou alternatifs, (2) la comparaison de cycles de vie alternatifs pour un système technique spécifique, (3) l'identification des éléments impactants du cycle de vie d'un système technique [Roy et al., 2009]. Maintenant que j'ai présenté succinctement

l'ACV, je vais me focaliser sur la question de la participation dans les démarches d'ACV afin de questionner l'aspect collaboratif de la méthode ACV en lien avec les outils logiciels supports.

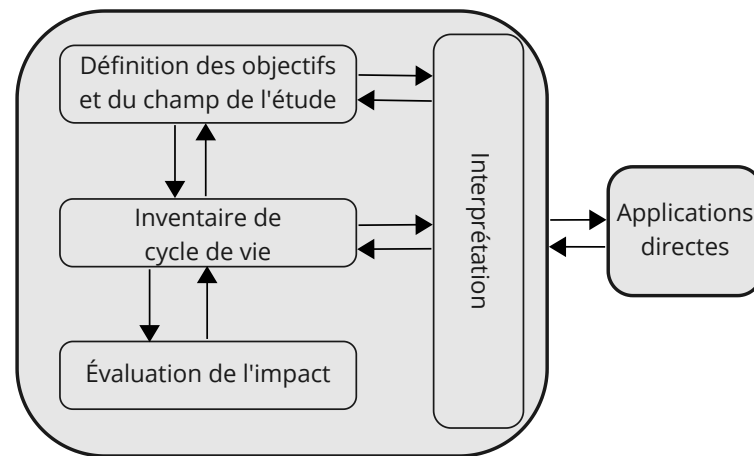


FIGURE 5.1 – Étapes décrites dans les normes ISO 14040 et 14044

La norme est composée de 4 étapes réalisées de manière itérative : (1) définition des objectifs et du champ de l'étude, (2) inventaire de cycle de vie, (3) évaluation de l'impact et (4) interprétation des résultats. Ces 4 étapes sont censées être au service d'applications directes.

La participation dans les démarches ACV

Ce qui m'intéresse par rapport à la permaingénierie est la capacité de la démarche ACV à faire naître des échanges entre les parties prenantes d'un projet d'ingénierie pour la soutenabilité. Cette capacité à créer de la participation entre acteurs a été identifiée dans la littérature. C'est l'objet de cette section.

Plusieurs axes de recherche ont été développés sur l'usage de l'ACV : la simplification des résultats de l'ACV pour les rendre compréhensibles par des non-experts [Rio et al., 2019] ou par exemple la question de la simplification de la démarche ACV elle-même [Hur et al., 2005]. Certains chercheurs ont pris le parti de rendre la démarche d'ACV plus transparente : "En fait, pour certains, la légitimité d'un processus d'évaluation environnementale est discutable s'il ne prévoit pas une participation significative (Gibson, 1993; Roberts, 1998; Wood, 1995)" [Sinclair et al., 2008]. Apporter plus de collaboration dans la méthode et les outils d'évaluation environnementale n'est pas une idée nouvelle (Sala et al., 2013). En effet, "dès 1995, il a été suggéré que la participation à [l'analyse environnementale] est propice à un large apprentissage individuel et social qui pourrait permettre la transition vers la durabilité (Diduck et Mitchell, 2003; Fitzpatrick et Sinclair, 2003; Palerm, 2000; Sinclair et Diduck, 2001; Webler et al., 1995)." [Sinclair et al., 2008]. Il est possible de voir dans le message de [Sinclair et al., 2008] un lien avec la proposition de permaingénierie dans les artefacts numériques. En effet, les méthodes et outils supports sont des vecteurs de diffusion de l'ingénierie pour la soutenabilité.

Aussi, [Borrion et al., 2019] déclare : "La communauté de l'ACV est très intéressée à repousser les limites au-delà des utilisateurs experts (par exemple, Brezet et al. 1999; Sinclair et al. 2007)". Cette problématique est directement liée aux outils logiciels supports à la méthode ACV. Comme le déclare Borrion : "Être capable de développer la prochaine

génération d'outils d'ACV qui peuvent aider un plus grand nombre de décideurs tels que les gestionnaires de l'industrie, les développeurs, les concepteurs urbains, les planificateurs d'infrastructures, les gestionnaires de domaines, les utilisateurs de produits et les résidents locaux ou les représentants des communautés." [Borrion et al., 2019]. Pour cette raison, il semble pertinent d'appliquer la proposition de permaingénierie à un artefact numérique d'analyse environnementale. En effet, la proposition de permaingénierie est supposée accentuer la collaboration au sein des acteurs des pratiques d'ingénierie.

Conclusions sur le choix de la méthode ACV

Ainsi, je me suis intéressée aux logiciels supportant la méthode ACV pour 4 raisons :

- Raison 1 : la méthode d'ACV est un outil multicritères qui permet de rentrer dans la complexité des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un service. Ainsi, l'outil logiciel supporte le développement d'une vision systémique des impacts environnementaux. Cela est cohérent avec l'impératif de vision systémique porté par la permaingénierie ;
- Raison 2 : la participation dans l'analyse environnementale est un axe de recherche qui s'est développé et qui croise notre proposition de collaboration dans les outils numériques de permaingénierie ;
- Raison 3 : l'ACV est une méthode connue de différents secteurs (le monde académique, le monde industriel, les organisations non gouvernementales) et donc de différentes parties prenantes. C'est une méthode qui peut être utilisée dans l'ensemble des secteurs d'activité. Cette méthode est reconnue comme robuste. Ainsi, si notre prototype correspond à des valeurs de permaingénierie, diverses organisations en transition pourraient être intéressées à l'utiliser (logique de diffusion).
- Raison 4 : la méthode ACV demande l'interaction de nombreuses parties prenantes au cours de la démarche et peut avoir des conséquences à plusieurs niveaux d'une entreprise selon le contexte de l'étude. Ainsi, si notre prototype est pertinent, il pourra continuer à être développé et contribuer au partage des valeurs de la soutenabilité à l'ensemble des parties prenantes d'un projet d'analyse de cycle de vie.

Maintenant que l'analyse de cycle de vie, en tant que méthode d'aide à la conception pour la soutenabilité, a été détaillée et son choix dans mon étude justifiée, la section suivante sera davantage focalisée sur les outils logiciels d'experts supports à la démarche ACV.

5.1.2 Outil logiciel expert support à l'ACV

Cette section permet de définir le type d'interaction ACViste - logiciel ACV au niveau des logiciels experts d'ACV. Je me suis focalisée sur un logiciel opensource nommé openLCA car ce logiciel est représentatif des logiciels experts d'ACV. Afin de travailler sur l'IHM ACV-ACViste, j'ai combiné deux types de méthodes :

- État de l'art des freins à la collaboration en ACV,
- Observations d'usage d'outils d'ACV par des étudiants (dont les analyses ont été partagées dans un article [Grimal et al., 2021c]).

Je vais donc présenter différentes captures d'écran décrivant des actions courantes lors de la réalisation d'une ACV et tenter de caractériser les interactions humains-machines en jeu.

Interactions ACViste - ACV : exemple avec openLCA

Cette section est une introduction aux possibilités d'interactions avec un logiciel d'ACV, openLCA. Cela permet d'assurer au lecteur une compréhension des interactions humains-machines avec un logiciel d'ACV classique.

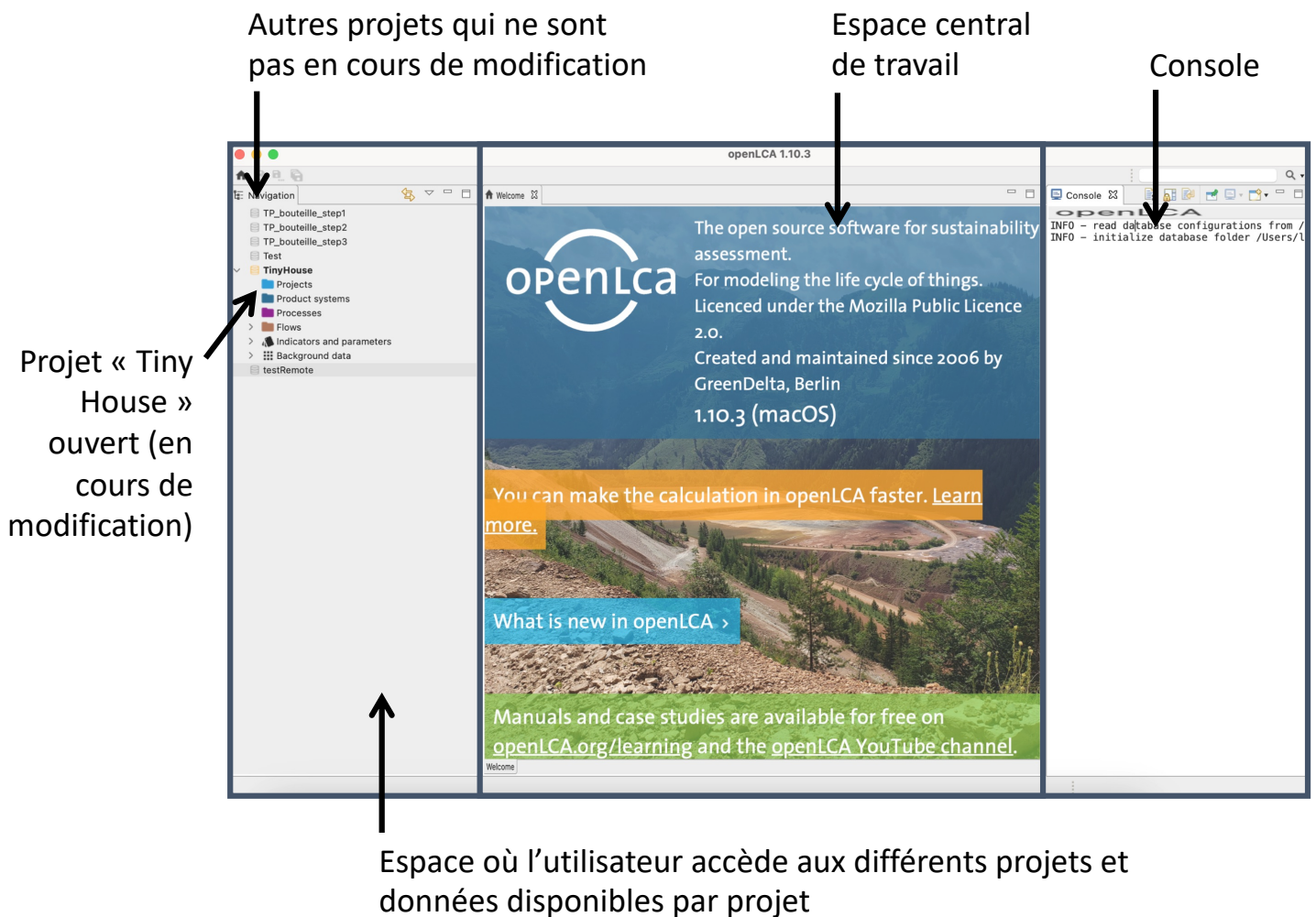


FIGURE 5.2 – Description de l'interface d'ouverture d'un projet dans openLCA

Au niveau de l'interface, il est possible de distinguer trois zones. Ces trois zones sont encadrées en noir sur la figure. La zone de gauche présente les bases de données disponibles, la zone du milieu représente l'espace principale de travail de l'utilisateur, et la zone de droite est la console. L'interface est accessible en local, sans accès à internet. Sur la zone de droite, se trouve une navigation avec des projets. Les projets "fermés", c'est-à-dire qui ne sont pas en cours de modification, sont indiqués par une base de données grise. Le projet ouvert, c'est-à-dire en cours de modification est indiqué par un icône de base de données jaune. Les dossiers apparus sont liés uniquement à ce projet en cours de modification et non aux autres projets fermés.

La figure 5.2 montre la page d'accueil du logiciel openLCA. Cette page est composée de trois zones : celle du milieu correspond à l'espace de travail principal de l'utilisateur, celle de gauche représente l'accès aux projets et aux données, celle de droite correspond à la console de logs. Je vais me concentrer sur les deux premiers espaces car ce sont là où l'utilisateur interagit le plus avec le logiciel. En effet, ces espaces sont les lieux où l'utilisateur navigue dans son projet, choisi les données, visualise les informations sur les données, lance les calculs d'impacts ou encore lie les données d'ACV entre elles pour modéliser son système technique.

Il s'agit à présent de montrer comment l'interface s'organise lorsque l'utilisateur manipule des données d'ACV. C'est ce qui est représenté dans la figure 5.3.

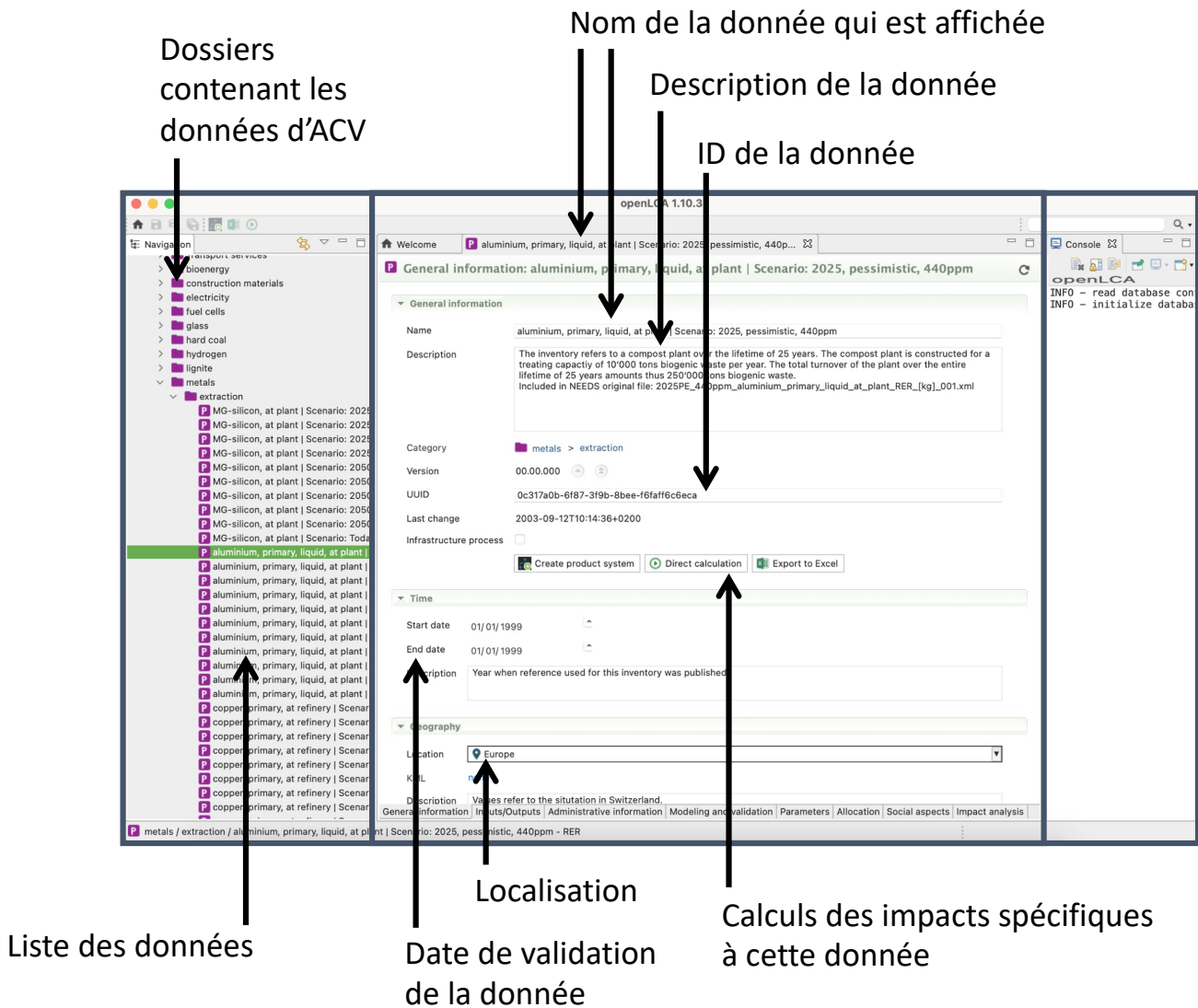


FIGURE 5.3 – Description de l'interface contenant les données d'ACV

L'interface montre une donnée d'ACV (processus industriel) ouverte dans le logiciel openLCA. Les différentes informations essentielles pour comprendre la donnée sont présentes : nom, description, identifiant unique, durée de validité, périmètre géographique.

Plus précisément, la figure 5.3 représente l'interface au moment où l'utilisateur a ou-

vert un dossier de bases de données (espace de gauche) et a sélectionné une donnée d'ACV. L'utilisateur peut choisir un projet (partie gauche) et sélectionner une donnée qui apparaîtra sur la partie centrale de l'interface. Il existe plusieurs types de données d'ACV. Celle qui est présentée est une donnée reprenant un processus industriel. La donnée possède un nom, une description, un identifiant unique, des informations sur la date de validité de la donnée, sa localisation, etc. L'utilisateur peut lancer des calculs sur cette donnée depuis l'interface et parcourir la liste des caractéristiques de la donnée (scroll souris). Les libellés des caractéristiques d'une donnée ne sont pas expliqués : l'utilisateur doit les maîtriser en amont pour les comprendre et choisir les données qui correspondent le mieux à son projet. L'absence d'indications rend le logiciel difficile à maîtriser pour des non-experts. Il n'existe pas d'informations indiquant à l'utilisateur non-expert où il en est dans le processus d'ACV.

Le logiciel peut être manipulé par une seule personne à la fois et cette personne doit connaître le déroulement d'une démarche ACV pour pouvoir progresser. Il n'y a pas de tutoriel intégré, d'exemples ou encore d'explication des libellés des éléments caractéristiques d'une donnée. Cette section permet de comprendre dès à présent que l'usage d'un logiciel ACV pour un non-expert peut s'avérer complexe et que le logiciel a été conçu pour être utilisé par une seule personne (un expert). Ainsi, la collaboration sur le logiciel est difficile.

Ces observations sont cohérentes avec les résultats de [Chatty et al., 2021] qui montrent que les logiciels experts sont plus fiables que les logiciels d'ACV simplifiés au niveau des résultats mais également beaucoup moins ergonomiques. En effet, GaBi et SimaPro, deux concurrents d'openLCA ont des scores faibles aux critères "Capacité d'apprentissage" et "Facilité d'utilisation".

L'activité principale réalisée par l'expert sur le logiciel d'ACV est de connecter les données entre elles afin de créer un système produit cohérent porteur d'impacts environnementaux. Pour cela, il est important de comprendre qu'il existe plusieurs types de données dans les bases de données d'ACV, chacune ayant un rôle différent dans la modélisation d'un système technique. Les trois types de données sont présentées dans la section suivante.

Interactions au niveau de la gestion des données d'ACV

Dans le chapitre résultats de cette thèse, je présenterai dans quelle mesure les participants de mes expérimentations ont eu des difficultés à comprendre les différences entre les types de données. Afin de comprendre cela, je vais présenter les différents types de données et leurs relations. Pour comprendre comment un utilisateur construit une modélisation et produit des résultats, il est nécessaire de distinguer trois types de données : les flux élémentaires, les flux technologiques et les données de processus industriels.

Les flux élémentaires sont les données qui portent les enjeux environnementaux. Si la modélisation d'un système technique dans un logiciel ne comprend pas de flux élémentaires, alors les impacts environnementaux du système technique étudié n'apparaîtront pas.

Les flux technologiques sont les données qui établissent des liens entre les données de processus industriels.

Les données de processus industriels sont les données qui comprennent des flux élé-

mentaires en entrée et sortie. Les processus industriels en jeu dans la conception d'un système technique doivent être reliés les uns aux autres par des flux technologiques.

Ainsi ces trois types de données ont des fonctions spécifiques et les différences doivent être maîtrisées par les participants à une démarche ACV souhaitant être autonome dans leur analyse environnementale. Les différences entre ces types de données ne sont pas expliquées au niveau du logiciel.

Au niveau de l'interaction avec l'outil, l'utilisateur doit sélectionner des données, les ouvrir, et donc changer régulièrement de fenêtre, sans pouvoir visualiser plusieurs données en même temps. Le nombre d'actions nécessaire est élevé et aucune barre de progression n'est disponible pour accompagner l'utilisateur dans la démarche. L'utilisateur ne peut pas utiliser de "drag and drop" ou de commandes rapides de retour en arrière. Les interactions entre un expert ACV et un logiciel d'ACV sont principalement focalisées autour des données d'ACV (choix des données, connexion des données entre elles). Ces interactions peuvent être positionnées dans le paradigme dit "personnel" de [Rauterberg, 2015], que nous avons vu au chapitre 3. La prochaine section synthétise les limites des logiciels ACV par rapport aux objectifs de permaingénierie.

Limites observées

L'analyse des interactions en jeu dans l'usage du logiciel openLCA montre les difficultés que peuvent rencontrer différents acteurs à manipuler collaborativement un logiciel expert d'ACV.

Les problématiques liées au logiciel sont les suivantes :

- Un logiciel expert conçu pour un usage individuel (non collaboratif),
- Une ergonomie rendant l'usage du logiciel peu efficace,
- Un logiciel expert avec un vocabulaire spécifique complexifiant la prise en main du logiciel,
- Couverture partielle des étapes de la démarche ACV qui peut mener à une segmentation des étapes ou à une incapacité des parties prenantes à avoir une vision globale de la démarche.

Si l'on reprend la structuration de [Rauterberg, 2015], il est possible de conclure que les logiciels classiques d'ACV sont ancrés dans un paradigme personnel de l'IHM. Or, ce qui nous intéresse est davantage le paradigme culturel (avec une culture autour des enjeux écologiques). Il est intéressant de se demander comment passer de l'un à l'autre, et si cela est possible.

Par rapport aux observations effectuées sur openLCA, j'ai construit le prototype ACVnum pour tenter de répondre aux limites observées. ACVnum a pour objectif de couvrir l'ensemble des étapes de la norme et d'offrir un espace de collaboration autour de la démarche ACV.

Conclusion : Les explications de cette section se sont principalement concentrées sur la manipulation de données d'ACV, portant des impacts environnementaux. Grâce à cette section, le lecteur peut comprendre à quoi ressemble un logiciel d'analyse de cycle de vie et quelles sont les actions que l'utilisateur réalise sur l'interface. Aussi, il est possible de voir que les actions sur le logiciel concernent principalement la manipulation de données d'ACV et la création de liens entre ces données en vue de créer un système cohérent.

La prochaine section est focalisée sur le prototype ACVnum afin de mettre en évidence les différences entre le prototype proposé et le logiciel d'ACV précédemment présenté. ACVnum a été construit pour pallier les limites rencontrées dans les logiciels experts.

5.2 Mise en oeuvre du prototype ACVnum

Cette section a pour objectif de présenter le prototype ACVnum. La première section fait le lien entre chaque caractéristique de la permaingénierie et les éléments du prototype ACVnum. La deuxième section est dédiée à une présentation descriptive du prototype.

5.2.1 Mise en lien du prototype avec les principes de la permaingénierie

L'objectif de cette section est de montrer comment le prototype ACVnum met en oeuvre les caractéristiques de la permaingénierie.

Caractéristique 1 : Un artefact qui médiatise l'éthique du *care*

Les personnes utilisant l'artefact doivent se poser la question "pourquoi je suis en train de faire une analyse environnementale? Quels sont mes objectifs? Est-ce que je pense que c'est pertinent par rapport à mes objectifs de soutenabilité?". Les parties prenantes du projet vérifient, en début d'usage du logiciel, si leur projet est cohérent avec des objectifs de soutenabilité forte. L'artefact numérique soumet l'objectif du projet à l'échange. C'est seulement après la vérification de la pertinence du projet que ce dernier est lancé. L'artefact numérique permet aux acteurs de s'entendre sur les objectifs de soutenabilité. Ainsi, la partie de l'ACV où l'unité fonctionnelle est décrite apparaît dans l'interface et est amenée avec d'autres questionnements plus larges autour de la posture de soutenabilité des parties prenantes.

Caractéristique 2 : Un objectif de soutenabilité forte

Le contenu du prototype reprend des éléments de la méthode analyse de cycle de vie (ACV). Bien que l'ACV ne permet pas d'appréhender les effets rebonds, cette méthode d'analyse environnementale multicritères permet de rentrer dans la complexité des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un service. Ainsi, la démarche ACV propose une vision locale (ecotoxicité) et globale (CO₂) des impacts environnementaux, suivant les indicateurs. Le lien avec les limites planétaires n'est pas évident car les indicateurs d'ACV ne sont pas directement reliés aux limites planétaires, même si certains indicateurs sont liés à ces limites (l'indicateur potentiel de réchauffement climatique est lié à la limite planétaire changement climatique). Je fais l'hypothèse qu'utiliser cette méthode dans un contexte de soutenabilité forte est suffisant pour accompagner une dynamique de soutenabilité forte.

Caractéristique 3 : Une activité d'ingénierie qui devient spécifique aux contextes locaux

Cette spécificité est plus difficile à mettre en œuvre quand le contexte d'usage n'est pas connu. Le terme "contexte" désigne ici un contexte de soutenabilité forte. À partir des caractéristiques énoncées dans la section 2, un système numérique a été réalisé où toute partie prenante peut :

- Accéder au système. Les avancées de la démarche sont accessibles aux parties prenantes directes et indirectes du projet, via un lien vers la plateforme. Il n'y a pas de mot de passe ou de restriction d'accès ;
- Comprendre le système. J'ai souhaité rendre accessible chaque étape à des personnes n'étant pas expertes de l'ACV. Les outils, par leur complexité, sont aujourd'hui difficile d'accès pour une personne non-experte de l'analyse environnementale. Ainsi, chaque étape est expliquée, détaillée (diminution de la complexité de la démarche sans simplification, plutôt par explication).
- Échanger avec les autres parties prenantes impliquées. La plateforme permet de proposer des commentaires, modifier des éléments, en ajouter ;
- Se former sur l'analyse environnementale. Un espace composé d'éléments pédagogique a été mis en place.

Caractéristique 4 : Une expertise qui se veut être positionnée sur la mise en relation

Dans les logiciels d'ACV actuellement sur le marché, les phases de définition des objectifs et du périmètre de l'étude, ainsi que l'interprétation des résultats n'apparaissent pas. En effet, les phases de la méthode ACV présentes dans les logiciels d'ACV sur le marché correspondent à deux phases : l'inventaire de cycle de vie et les calculs d'impacts environnementaux.

Il semble que les interrelations entre les 4 étapes de la démarche ACV ne sont pas représentées dans les logiciels classiques d'ACV. Or, dans la méthode ACV, les 4 étapes sont présentées de manière itératives et reliées les unes aux autres. J'ai donc choisi de proposer un prototype numérique complémentaire aux outils d'ACV existants qui propose des liens entre les 4 étapes de la démarche ACV.

Il a été choisi de médiatiser la collaboration par l'élargissement des étapes de l'ACV présentes sur le logiciel (passant de 2 à 4). C'est ce qui est représenté sur la figure 5.4. La figure 5.4 représente en (a) la méthode ACV telle que présentée dans la norme. La partie (b) représente la structuration logique du prototype ACVnum développé. Dans les outils logiciels d'ACV de type openLCA, SimaPro, il n'y a que 2 étapes qui sont présentes sur les 4 étapes de la norme. À l'inverse, dans le prototype ACVnum, il a été fait le choix de mettre l'ensemble des étapes dans le prototype.

De plus, le logiciel est accessible par l'ensemble des parties prenantes. Par accessible, cela signifie qu'il est techniquement possible d'y accéder et que son fonctionnement est compréhensible par la plupart des utilisateurs en une dizaine de minutes de manipulation.

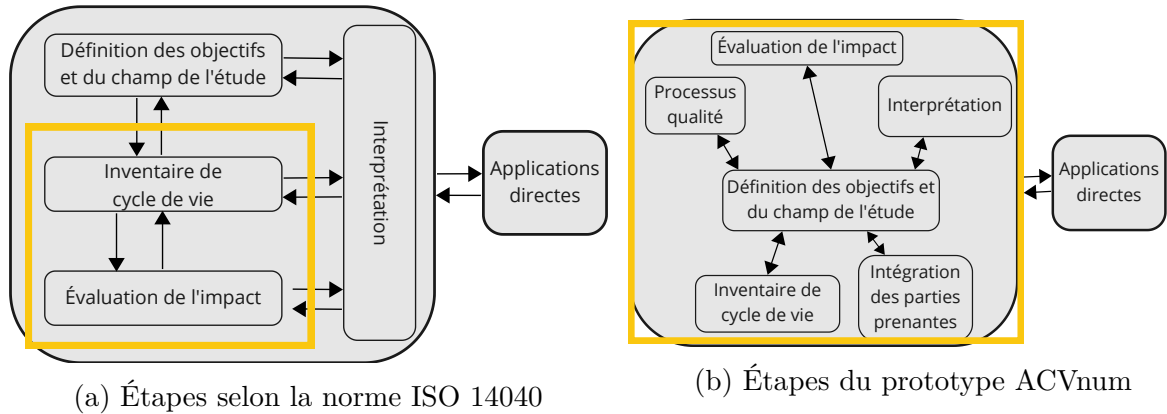


FIGURE 5.4 – Différences de périmètre entre les types de logiciels d'ACV

Chaque figure est composée de plusieurs étapes de la démarche ACV et d'un carré orange. Ce dernier encadre l'ensemble des étapes de la démarche ACV intégrées aux logiciels experts d'ACV pour 5.4a ou au prototype ACVnum pour 5.4b. Sur la figure 5.4a, la structure de la norme ACV est représentée, avec les 4 phases principales (définition des objectifs et du champs de l'étude, inventaire du cycle de vie, évaluation de l'impact, interprétation). Les flèches représentent les possibilités pour les utilisateurs de passer d'une étape à une autre.

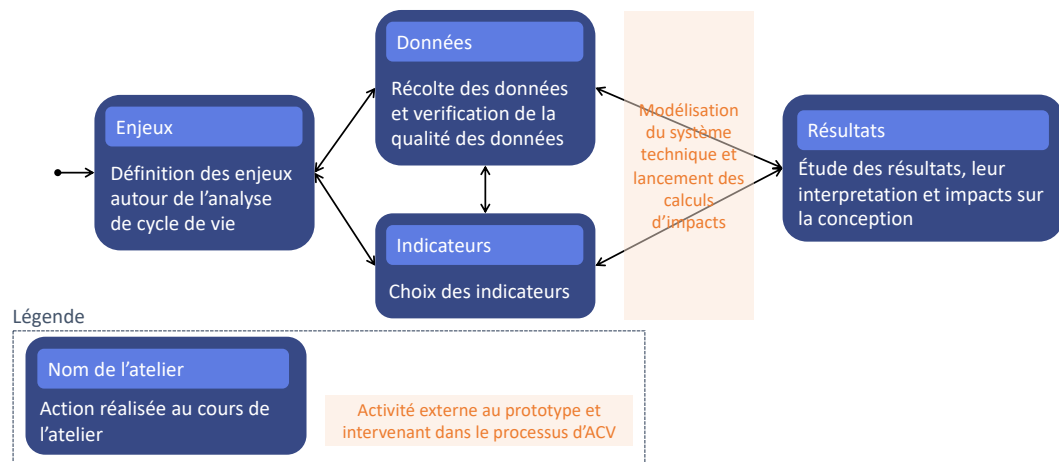


FIGURE 5.5 – Chemin utilisateur dans l'usage du prototype et ateliers disponibles

La figure représente 4 rectangles reliés entre eux par des flèches. Chaque rectangle représente un atelier présent sur le prototype ACVnum. Les flèches représentent les liens possibles entre les ateliers. Ainsi, un utilisateur doit commencer par l'atelier sur les enjeux pour comprendre l'ACV en cours de réalisation sur le prototype. Puis l'utilisateur peut réaliser parallèlement l'atelier sur les données et l'atelier sur les indicateurs. Enfin, l'utilisateur peut passer à l'atelier résultats. Avant l'atelier résultats, un expert ACV doit cependant réaliser quelques actions en dehors du prototype : (1) rentrer les données d'ACV choisis par les participants, (2) choisir la méthode de calcul choisie également par les participants pour lancer les résultats, (3) copier coller les résultats du logiciel expert vers le prototype. Ces étapes ne sont pas décrites car ne sont pas visibles dans le prototype ACVnum.

5.2.2 Choix de conception

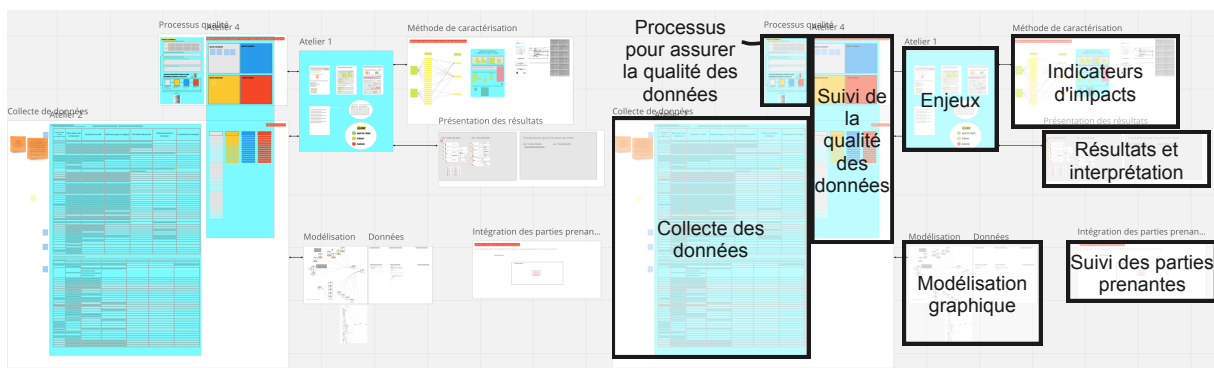
Afin de présenter les choix de conception, j'ai choisi de réaliser une présentation descriptive générale du prototype, puis de présenter plus précisément chaque atelier du prototype. Cela permet d'avoir une vision globale du prototype avant de zoomer sur ses différentes composantes.

Présentation descriptive générale

Mon objectif est d'explicitier mes choix de conception pour la réalisation d'une interface d'analyse de cycle de vie collaborative. Avant de présenter les différentes composantes du logiciel, je souhaite présenter les choix conceptuels que j'ai réalisés. Ces choix sont représentés en figure 5.5. Le processus est composé de quatre phases : enjeux, données, indicateurs d'impacts et résultats d'ACV. Les phases concernant les données et les indicateurs peuvent être réalisés simultanément. Les phases sont à réaliser de manière itérative.

Il a été choisi de médiatiser la collaboration dans un format spécifique, utilisant des ateliers supportés par un logiciel. Un atelier est un espace et un temps de travail collectif où les parties prenantes de la démarche ACV peuvent co-construire l'ACV : échanger sur les enjeux, se mettre d'accord sur la nomenclature, exprimer leurs doutes, leurs réflexions et les décisions à prendre suite à la démarche. Ces ateliers vont être détaillés dans les prochaines sections. Je suis consciente que cette manière d'amener la collaboration est une approche parmi d'autres. Ces ateliers ont été créés afin de permettre la collaboration et sont visibles sur la figure 5.6.

Un utilisateur commence par l'atelier sur les enjeux (espace "Enjeux"), ensuite peut réaliser l'atelier sur les données ("Collecte de données", "Suivi de la qualité des données", "Processus pour assurer la qualité des données") et l'atelier sur les indicateurs (dans l'ordre qu'il / elle souhaite), puis l'atelier sur les résultats ("résultats et interprétation"). L'utilisateur peut naviguer dans les différents ateliers.



(a) Capture d'écran du prototype ACVnum (b) Capture d'écran avec chaque zone identifiée

FIGURE 5.6 – Prototype ACVnum

Cette figure représente une capture d'écran du prototype ACVnum. La figure 5.6a est une capture d'écran vierge, tandis que la figure 5.6b représente cette même capture d'écran avec la structuration du prototype mise en évidence.

Chaque espace du prototype ACVnum présent sur la figure 5.6 est décrit ci-dessous :

- Définition des enjeux ("Enjeux") : cet espace est un atelier d'une heure afin de permettre aux participants de la démarche ACV d'exprimer leurs enjeux, pourquoi ils souhaitent faire une analyse environnementale, quel besoin est ciblé, quelle unité fonctionnelle est exprimée ;
- Modèle graph ("Modélisation graphique") : cet espace sert à représenter sous forme de graphique différents éléments du système technique analysé ;
- Traçage de la qualité des données ("Suivi de la qualité des données") : cet espace est dédié au suivi de la qualité des données insérées à plusieurs endroits du processus d'analyse environnementale (dans la représentation du système technique, dans les quantités de matériaux ou d'énergie, dans les données choisies dans le logiciel d'ACV).
- Collecte des données ("Collecte de données") : cet espace sert à organiser la collecte de données via un tableau ;
- Processus suivi pour assurer la qualité des données ("Processus pour assurer la qualité des données") : cet espace permet aux acteurs de la démarche ACV d'expliquer comment ils vont assurer une qualité des données ;
- Indicateurs d'impacts ("Indicateurs d'impacts") : cet espace permet aux acteurs de la démarche ACV de choisir les impacts environnementaux qui sont pertinents par rapport au système technique et par rapport à leurs enjeux ;
- Résultats et interprétation ("Résultats et interprétation") : cet espace permet de mettre les captures d'écran des résultats et d'en discuter avec l'ensemble des acteurs du projet ;
- Traçage de la participation des parties prenantes ("Suivi des parties prenantes") : cet espace permet d'ajouter les noms et fonctions des personnes prenant part au processus d'analyse environnementale.

Chacun des ateliers va être détaillé dans la section suivante.

Présentation détaillée

Cette section va me permettre de présenter chaque section du prototype, à savoir, les 4 ateliers principaux :

- Atelier sur les enjeux
- Atelier sur les indicateurs
- Atelier sur les données
- Atelier sur les résultats

Les espaces "Modélisation graphique" et "Suivi des parties prenantes" ont été mises de côté car n'ont pas été utilisées par les participants lors des expérimentations.

Atelier sur les enjeux

L'atelier sur les enjeux, visible en figure 5.7, est structuré en trois parties. L'atelier porte trois objectifs principaux (un par partie) :

- Partie 1 : s'assurer que tout les participants sachent ce qu'est une analyse environnementale et ont un premier échange sur les connaissances de chacun,

- Partie 2 : définir l'objectif de l'analyse environnementale qui va être réalisée,
- Partie 3 : définir le périmètre de l'analyse environnementale qui va être réalisée.

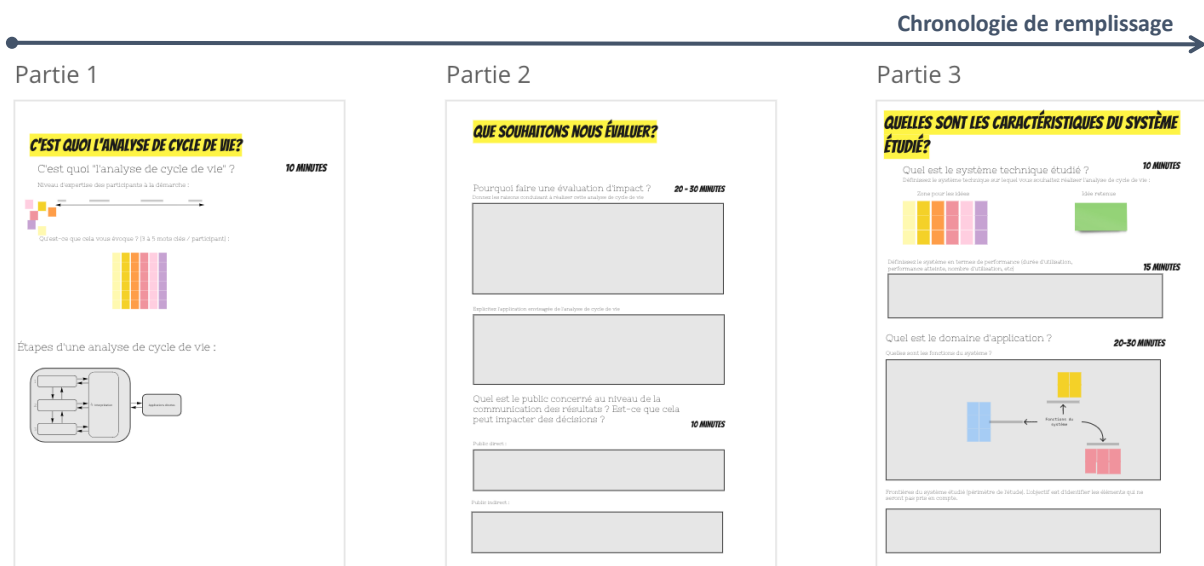


FIGURE 5.7 – Atelier sur les enjeux de l'ACV réalisée

Cette figure est une capture d'écran de l'atelier "Enjeux" du prototype ACVnum. La capture d'écran montre trois espaces constituant l'atelier, nommés (de gauche à droite) "Partie 1", "Partie 2", "Partie 3". Les ateliers sont à réaliser dans l'ordre chronologique, comme indiqué par la flèche en haut de la figure.

Dans le cadre d'une démarche participative, il est important que les participants puissent s'exprimer. Ainsi, cet atelier permet aux participants de s'exprimer leur positionnement par rapport à l'analyse de cycle de vie (savoir dire que l'on ne sait pas) et leurs attentes. L'activité permet également au groupe de se mettre d'accord sur l'objectif de l'analyse environnementale, via un échange et le système technique choisi (intérêt de ce système en fonction de l'objectif).

Chaque partie de l'atelier va être détaillée dans la suite de la section, ainsi que les interactions entre les participants et le logiciel.

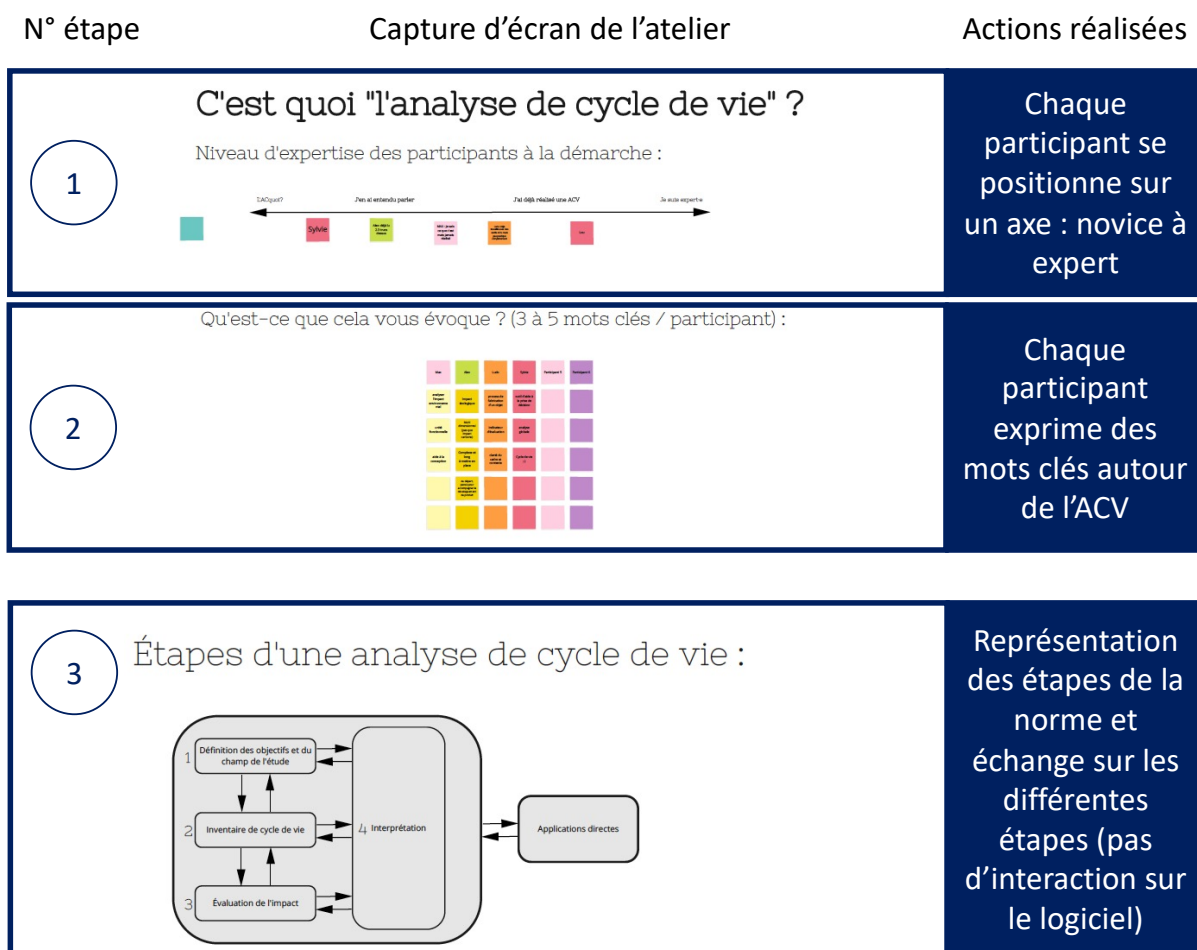


FIGURE 5.8 – Partie 1 de l'atelier sur les enjeux de l'ACV

La figure est composée de trois sections horizontales composant les trois sections de la première partie de l'atelier "Enjeux" du prototype ACVnum. Chaque ligne est composée d'un numéro (de 1 à 3), d'une capture d'écran du prototype ACVnum et des actions principales réalisées lors de cette section par les participants.

La figure 5.8 permet de montrer que cette "Partie 1" de l'atelier autour des enjeux de l'ACV est structurée en 3 sections (numérotées sur la figure). Les deux premières sections doivent permettre aux participants d'exprimer leur "niveau" de connaissance en ACV, afin que le groupe qui va conduire l'évaluation environnementale apprenne à se connaître (forces et faiblesses de chacun). Aussi, il permet à chacun de réfléchir sur ce qu'est l'analyse environnementale et d'échanger sur le sujet. La troisième section est censée être animée par un expert pour expliquer les différentes étapes de l'analyse de cycle de vie. Une vidéo peut être mise à la place également.

Pour les deux premières sections de la partie 1 de l'atelier "Enjeux", les utilisateurs doivent sélectionner des post-it pour pouvoir écrire à l'intérieur (étape 1 et 2 par exemple). Un post-it peut également être déplacé lorsque l'utilisateur et être positionné n'importe où sur l'interface.

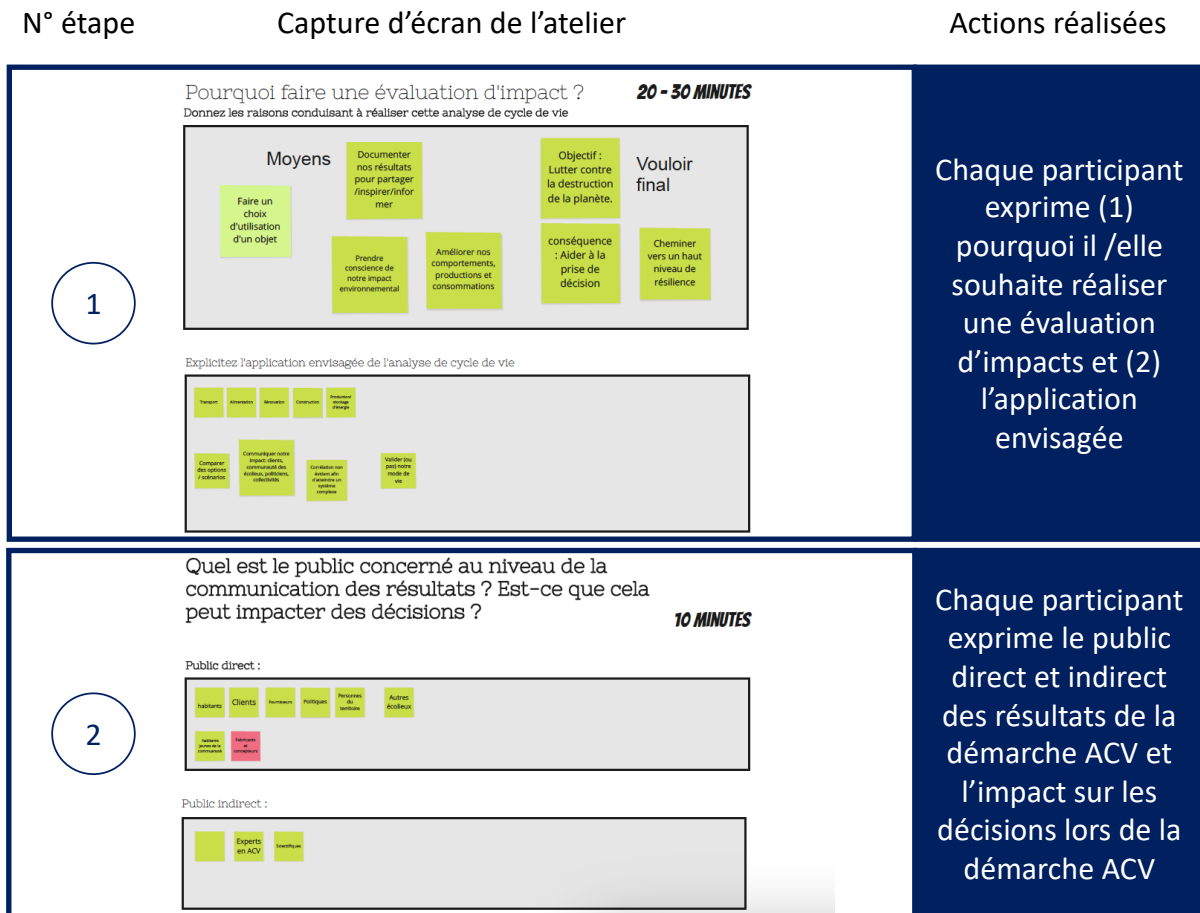


FIGURE 5.9 – Partie 2 de l'atelier sur les enjeux de l'ACV

La figure est composée de deux sections composant la deuxième partie de l'atelier "Enjeux" du prototype ACVnum. Chaque ligne est composée d'un numéro (1 et 2), d'une capture d'écran du prototype ACVnum et des actions principales réalisées lors de cette section par les participants.

La figure 5.9 permet de montrer que cette "Partie 2" de l'atelier autour des enjeux de l'ACV est structurée en 2 sections (numérotées sur la figure). La première est nommée "Pourquoi faire une évaluation d'impact ?" avec deux sous-sections : (1) "Donnez les raisons conduisant à réaliser cette analyse de cycle de vie" et (2) "Explicitiez l'application envisagée de l'analyse de cycle de vie". Ainsi, les participants doivent exprimer pourquoi ils réalisent une ACV (raisons qui les ont poussé à se lancer dans la démarche), dans quelle mesure cette ACV va être utilisée (à quelles fins). La deuxième section concerne la section "Quel est le public concerné au niveau de la communication des résultats? Est-ce que cela peut impacter des décisions?", avec deux niveaux de réflexion : le public direct et le public indirect de l'ACV. Cela permet aux participants de positionner la démarche ACV dans une stratégie de conception ou de reconception. La troisième section permet aux participants de réfléchir sur le public cible de l'ACV.

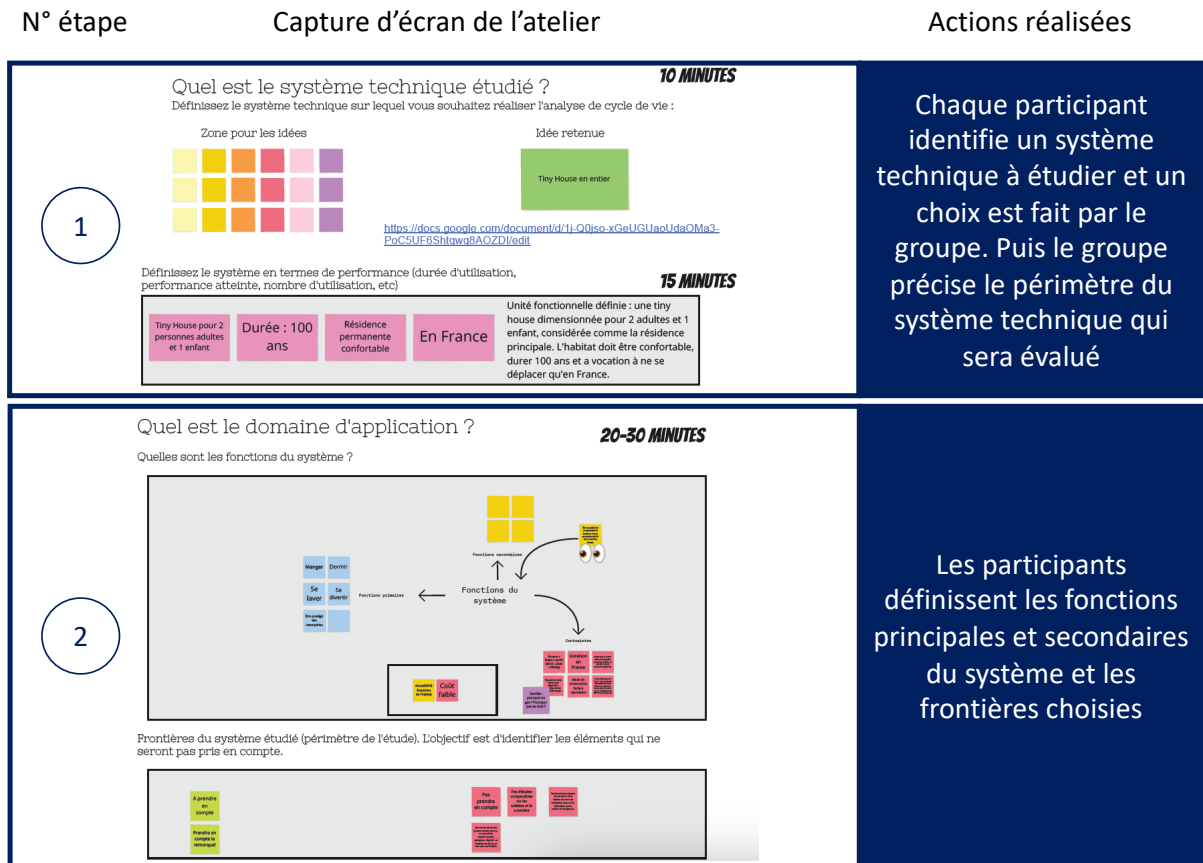


FIGURE 5.10 – Partie 3 de l'atelier sur les enjeux de l'ACV

La figure est composée de deux sections horizontales composant les deux sections de la troisième partie de l'atelier "Enjeux" du prototype ACVnum. Chaque ligne est composée d'un numéro (1 et 2), d'une capture d'écran du prototype ACVnum et des actions principales réalisées lors de cette section par les participants.

La figure 5.10 permet de montrer que cette "Partie 3" de l'atelier autour des enjeux de l'ACV est structurée en 2 sections (numérotées sur la figure). Cette section répond donc à la question "Quel est le système technique étudié?". La première sous-section permet aux participants de réaliser un brainstorming autour des systèmes techniques intéressants à analyser (en fonction de la "Partie 2" où les participants définissent les raisons qui les ont poussées à réaliser une ACV). La deuxième sous-section permet aux participants de préciser le choix qui a été réalisé (notamment au niveau du périmètre), pour obtenir une unité fonctionnelle.

Atelier sur les indicateurs

L'atelier sur les indicateurs, représenté en figure 5.11, est structuré en trois parties. L'atelier porte un objectif principal : Permettre aux participants de comprendre le choix d'une méthode de calculs d'impacts environnementaux. Cet objectif sous-entend que les participants doivent apprendre à lier les systèmes industriels liés à leur système technique aux enjeux environnementaux.

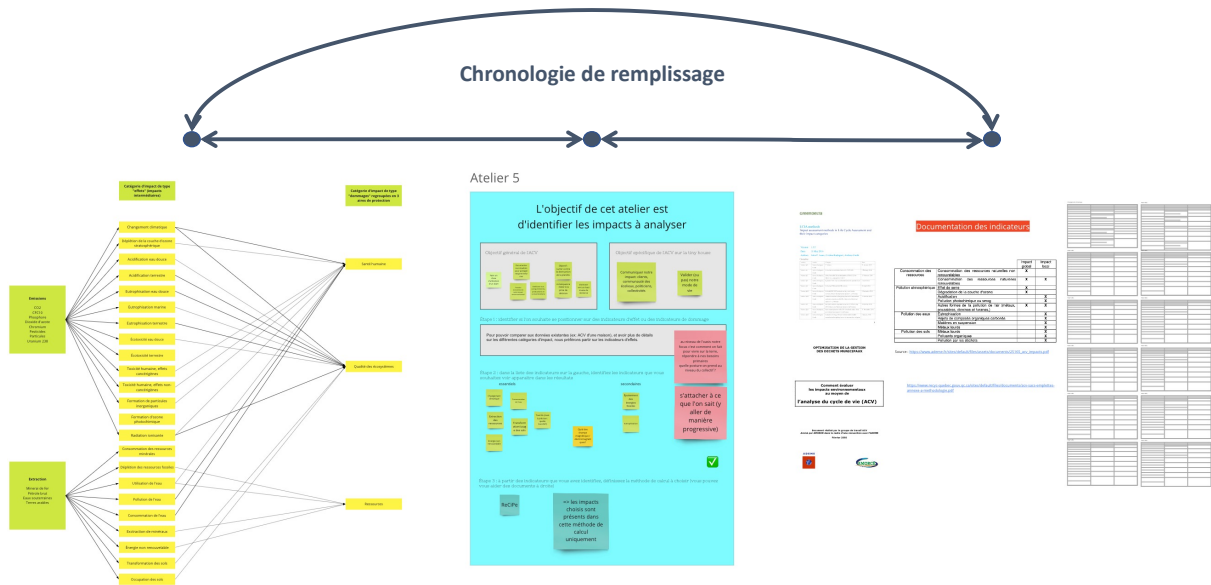


FIGURE 5.11 – Chronologie pour remplir l’atelier sur les indicateurs

L’atelier est composé de trois parties. La partie la plus à gauche est une liste des indicateurs environnementaux, listés selon leur type (midpoint, endpoint). La partie du milieu (carré bleu) correspond à l’espace où les participants peuvent insérer leurs prises de décision. La partie de droite est un espace de documentation autour des indicateurs d’impacts.

Il n’existe pas de chronologie spécifique pour remplir cet atelier. Les participants peuvent commencer par prendre connaissance des indicateurs d’impacts (partie gauche), ou de la documentation en général sur ces indicateurs (partie droite). Ils peuvent également commencer par identifier les questions auxquelles ils vont devoir répondre (partie centrale en bleu). Au cours de cet atelier, les participants peuvent en apprendre plus sur chaque indicateur d’impact et ainsi gagner en expertise sur ce sujet. Selon les indicateurs d’impacts sélectionnés, ils ont de la documentation pour assurer le lien entre les indicateurs et les méthodes de calculs permettant de produire des résultats.

La partie présente sur la figure 5.12 est celle qui permet aux utilisateurs d’avoir une vue d’ensemble des indicateurs d’impacts environnementaux. Aucune interaction physique n’est nécessaire sur cet espace. Cependant, si les utilisateurs le souhaitent, ils peuvent modifier la liste (contenu et forme).

N° étape

Capture d'écran de l'atelier

Actions réalisées

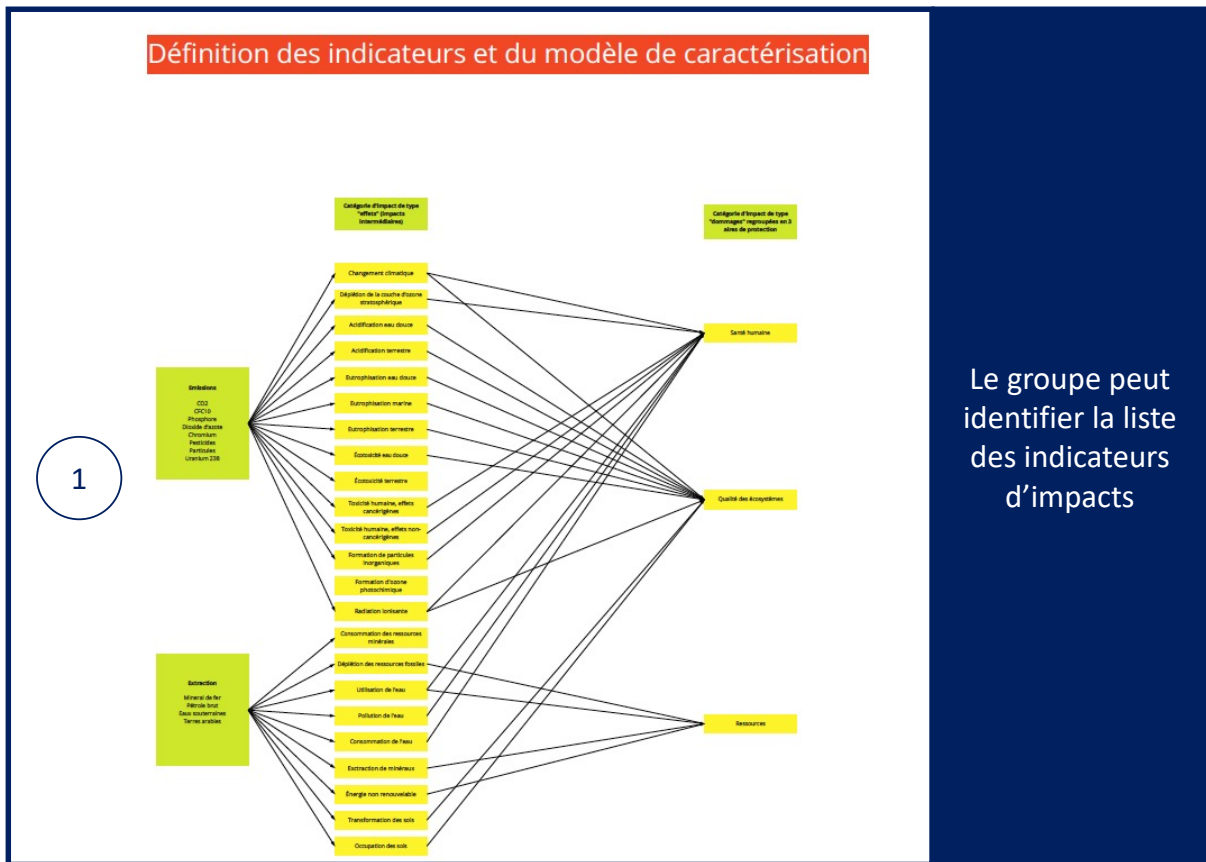


FIGURE 5.12 – Partie 1 de l'atelier sur les indicateurs d'impacts

Sur la figure, il est possible d'identifier trois colonnes. La première colonne comprend deux blocs verts, dont le contenu est peu visible sur la capture d'écran : "Émissions" et "Extraction". Ainsi, certains indicateurs sont des indicateurs d'impacts liés aux émissions de particules dans l'air, les sols ou l'eau, tandis que d'autres sont liés à l'extraction de matières premières dans les sols. La colonne du milieu, possède un entête "Catégorie d'impact de type "effets" (impacts intermédiaires)" et une liste d'indicateurs : changement climatique, Déplétion de la couche d'ozone stratosphérique, Acidification eau douce, Acidification terrestre, Utilisation de l'eau, Pollution de l'eau, Extraction de minéraux, etc. La dernière colonne possède un entête intitulé "Catégorie d'impact de type "dommages" regroupées en 3 aires de protection" et trois éléments : "Santé humaine", "Qualité des écosystèmes", "Ressources".

La figure 5.13 représente la section centrale, divisée en 4 lignes. La première ligne reprend les objectifs généraux de l'ACV ainsi que les objectifs spécifiques de l'ACV en cours. Ces objectifs sont repris de l'atelier enjeux. La deuxième ligne permet aux participants d'échanger sur le type d'indicateurs d'impacts souhaité par le groupe : de type "effet" ou de type "dommage". La troisième ligne a pour objectif que les participants expriment les indicateurs qui doivent apparaître dans les résultats. Enfin, la quatrième et dernière ligne est un espace où la méthode de calcul choisi par les participants est indiquée. Pour remplir cet espace, les participants doivent lier les indicateurs aux méthodes de calculs grâce à la documentation présente sur la partie 3.

N° étape	Capture d'écran de l'atelier	Actions réalisées
	<p>L'objectif de cet atelier est d'identifier les impacts à analyser</p>	
1		Les participants identifient l'objectif de l'ACV en cours de réalisation
2		Les participants choisissent le type de données pour l'ACV
3		Les participants choisissent les indicateurs pour l'ACV
4		Les participants choisissent une méthode de calculs d'impacts liés aux indicateurs choisis précédemment

FIGURE 5.13 – Partie 2 de l'atelier sur les indicateurs d'impacts

Quatre espaces sont visibles : (1) un espace où les participants peuvent identifier l'objectif de l'ACV en cours de réalisation, (2) le type de résultats souhaité, (3) les indicateurs à avoir dans les résultats (prioritaires et secondaires), (4) la méthode de calculs d'impacts liés aux indicateurs précédemment choisis.

La partie 3 de l'atelier sur les indicateurs d'impacts est visible sur la figure 5.14 est composée de deux espaces. Le premier permet aux participants de comprendre les liens entre les indicateurs d'impacts et les méthodes de calculs (des tableaux de correspondance sont disponibles). Les participants peuvent cliquer sur des PDF et tourner les pages (cette fonctionnalité n'est pas toujours visible par les participants).

L'atelier peut s'avérer complexe car il oblige les participants de la démarche à :

- Faire le lien entre le système technique (matériaux et processus) et les impacts environnementaux,
- Faire le lien entre les indicateurs d'impacts et les méthodes de calculs,
- Faire le lien entre les objectifs de l'ACV et les indicateurs d'impacts.

L'outil support au prototype ACVnum permet des interactions plus facile pour les participants, avec une capacité d'apprentissage grâce à la documentation et une facilité d'utilisation dû à l'ergonomie.

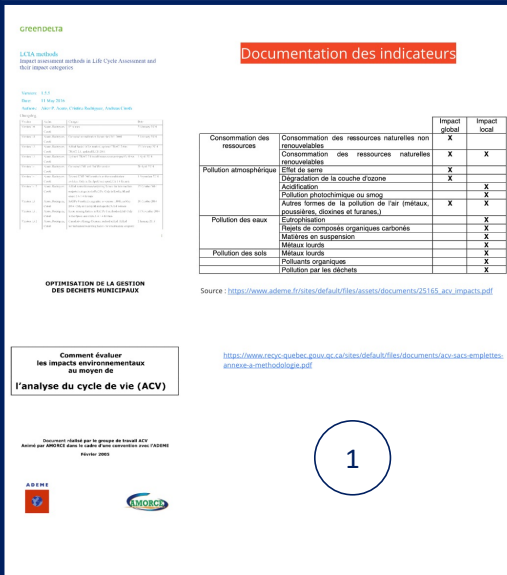

Actions réalisées	Capture d'écran de l'atelier	Capture d'écran de l'atelier	Actions réalisées
<p>Ces contenus sont liées aux méthodes de calculs d'impact pour faire que les participants puissent savoir quels indicateurs sont liés à quelles méthodes de calcul</p>			<p>Chaque indicateur connu possède une fiche que les participants peuvent lire ou compléter pour les aider à choisir les indicateurs d'impacts</p>

FIGURE 5.14 – Partie 3 de l'atelier sur les indicateurs d'impacts

Il y a deux espaces dans cette 3e partie de l'atelier. Le premier espace permet aux indicateurs de faire le lien entre les indicateurs environnementaux et les méthodes de calculs permettant de produire les résultats. Le deuxième espace est composé de 12 tableaux, chaque tableau correspond à un indicateur.

Atelier sur les données

L'atelier sur les données doit permettre aux participants de lister l'ensemble des matériaux et processus industriels nécessaires pour constituer le système technique étudié. Une grande partie de l'atelier est centré autour de la qualité des données. La qualité de la démarche d'ACV dépend de la qualité et la fiabilité des données. Il y a peu de documentation dans cette section, ce qui peut rendre cet atelier difficile à remplir pour les novices ou les personnes peu à l'aise avec la gestion de données techniques.

Il n'y a pas de chronologie spécifique à cet atelier. L'atelier est composé de quatre zones, dont trois concernent la qualité des données. La quatrième zone est centrée sur la récolte des données composant la nomenclature du système technique étudié. Les participants sont invités à remplir ce tableau avec les matériaux et les processus industriels de transformation des matériaux composant le système technique étudié.

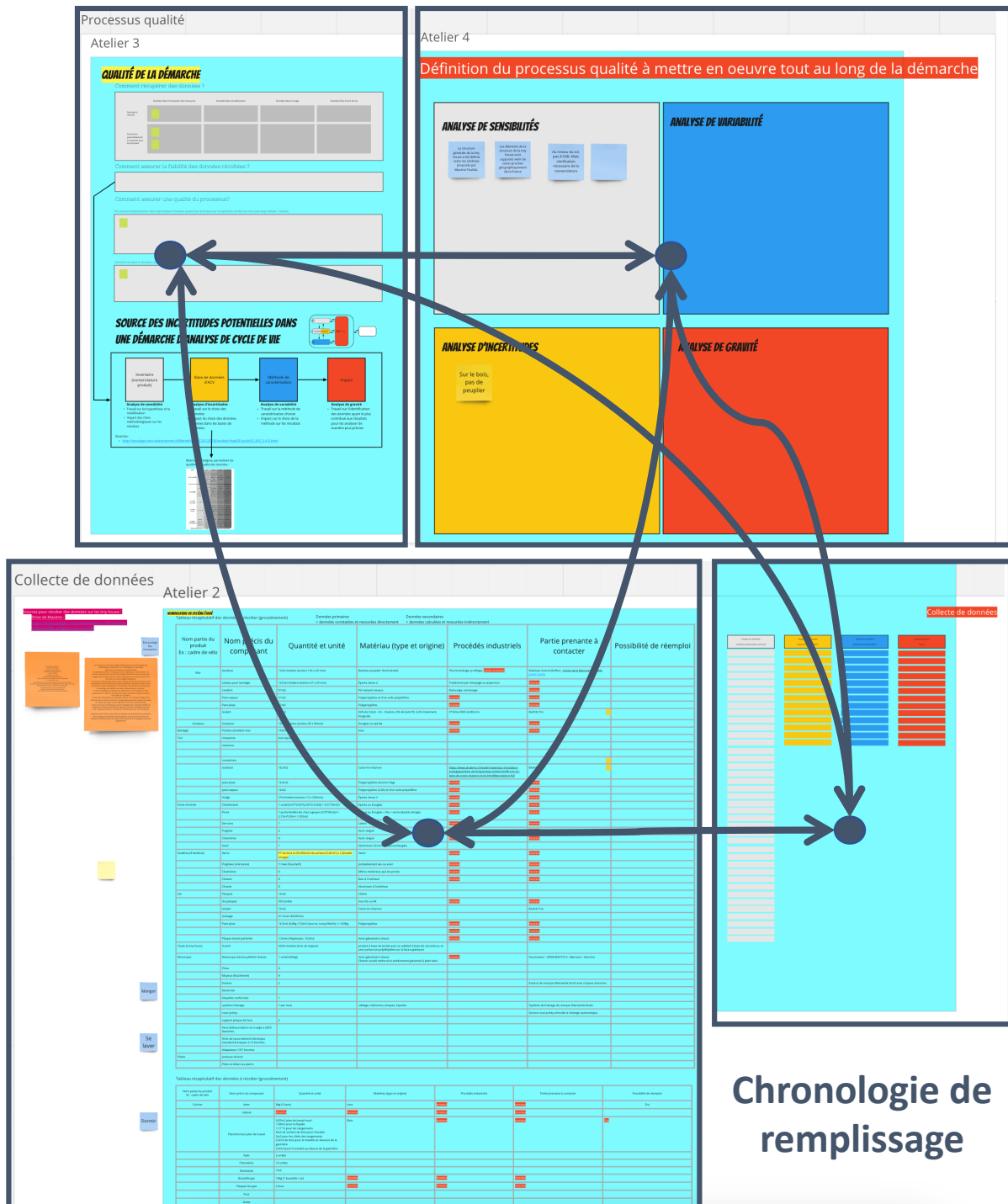


FIGURE 5.15 – Différentes sections de l’atelier sur les données

L’atelier est composé de quatre zones : (1) en haut à gauche un atelier sur la qualité de la démarche pour définir des processus permettant de récolter des données fiables, (2) en haut à droite les hypothèses réalisées au niveau des données d’ACV et du périmètre choisi, (3) en bas à gauche la liste des processus industriels et matériaux composant le système technique, (4) en bas à droite la liste des hypothèses associées à chaque ligne du tableau listant les processus industriels et matériaux. Un code couleur lie les espaces (1), (2) et (4).

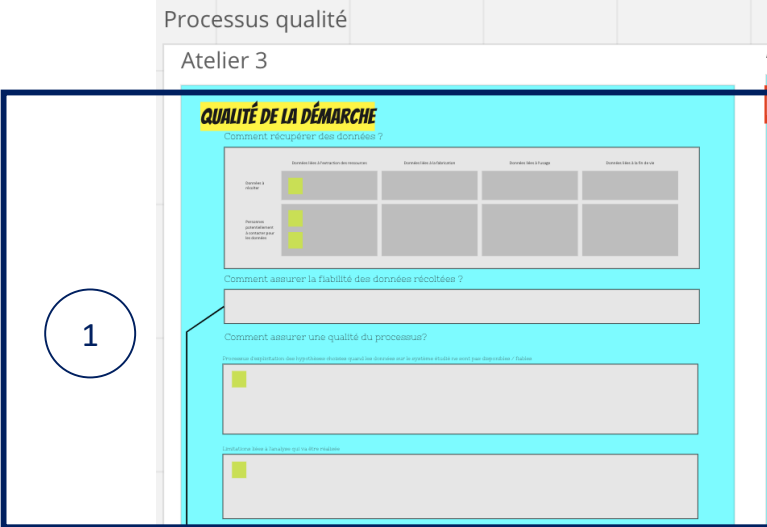
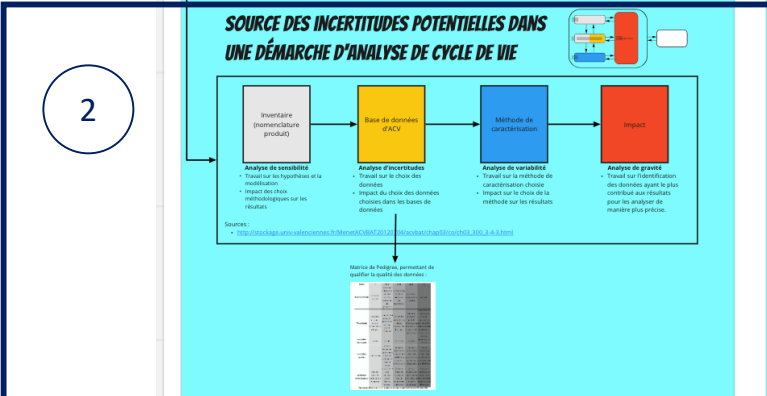
N° étape	Capture d'écran de l'atelier	Actions réalisées
1		Les participants peuvent répondre à plusieurs questions pour définir une démarche qualité au niveau de leur récolte de données
2		Les participants peuvent identifier les différentes sources d'incertitudes au cours de leur démarche (documentation)

FIGURE 5.16 – Partie 1 de l'atelier sur les données

La figure représente une partie de l'atelier sur les données. Cette partie est divisée en deux sous espaces qui sont numérotés sur la figure : l'espace numéroté 1 concerne la qualité de la démarche et permet aux participants de réfléchir en groupe autour de la manière de récolter des données et le process qualité à suivre ; l'espace numéroté 2 est une documentation autour des types d'analyses à effectuer au cours de l'analyse de cycle de vie (analyse d'incertitudes, analyse de sensibilité, analyse de variabilité, analyse de gravité).

La qualité des données est questionnée dans l'espace représenté dans la figure 5.16. Il y a plusieurs questions posées dans cette section :

- Comment récupérer des données ?
- Comment assurer la fiabilité des données récoltées ?
- Comment assurer une qualité du processus ?
 - Processus d'explicitation des hypothèses choisies quand les données sur le système étudié ne sont pas disponibles / fiables
 - Limitations liées à l'analyse qui va être réalisée

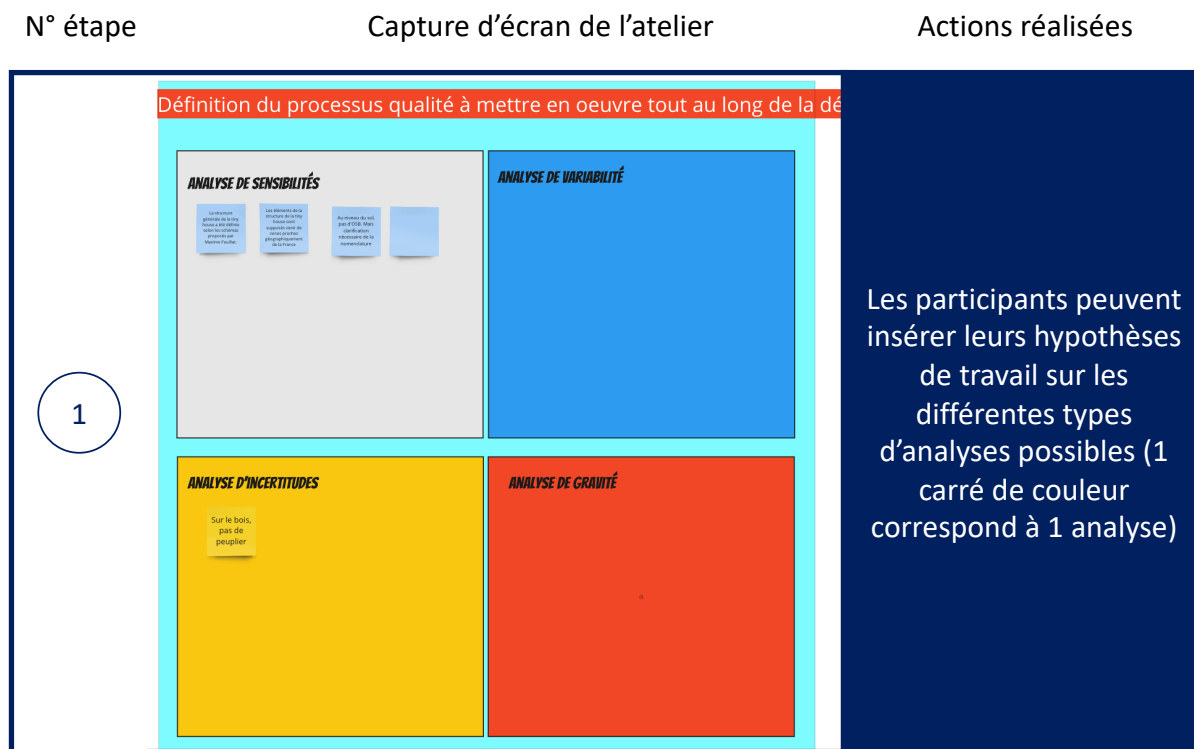


FIGURE 5.17 – Partie 2 de l'atelier sur les données

La figure est une capture d'écran d'une partie de l'atelier sur les données. La partie représentée est composée de quatre blocs de couleur, chacun représentant un type d'analyse. Les participants peuvent inscrire leurs hypothèses (sur la nomenclature du produit, sur les données à choisir dans un logiciel d'ACV) dans ces blocs (des post-its sont visibles sur la capture d'écran).

La figure 5.17 reprend les différents espaces d'analyses possibles lors de la réalisation d'une démarche ACV. Les couleurs sont identiques à celles reprises sur la figure représentée en 5.18 (partie 2).

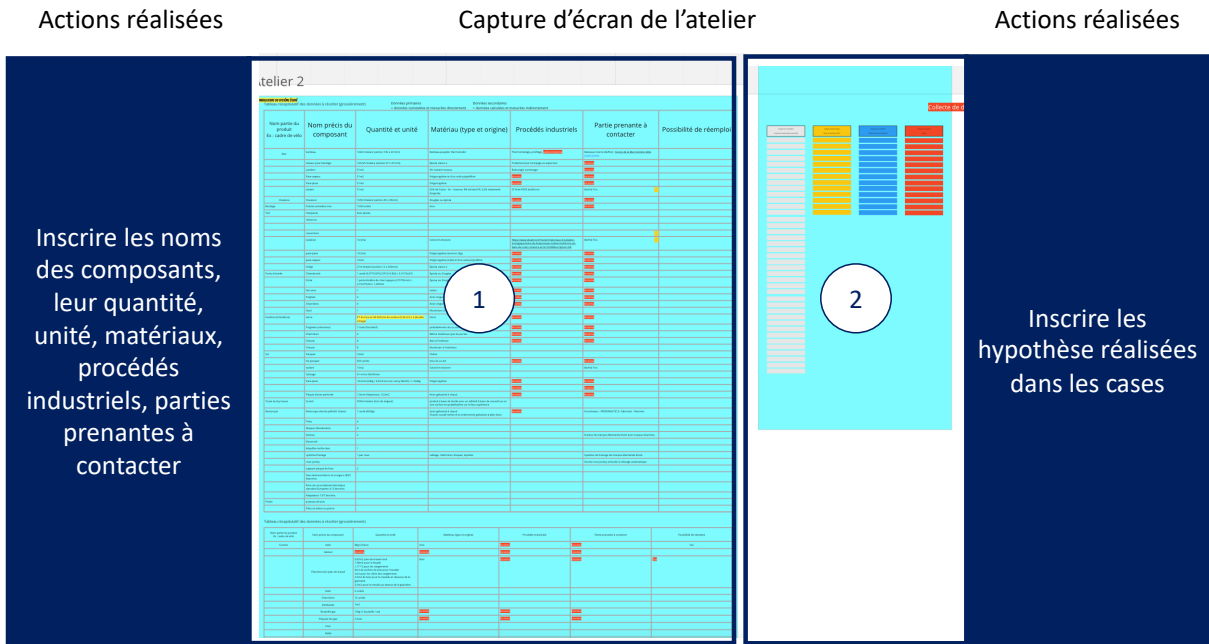


FIGURE 5.18 – Partie 3 de l'atelier sur les données

La figure est composée de deux espaces reliés. La partie 1 est un tableau permettant aux participants à la démarche de construire la nomenclature du produit. La partie 2 est une liste d'espaces colorés pour que les hypothèses puissent être associées aux lignes de la nomenclature.

Atelier sur les résultats

L'espace de résultats est visible sur la figure 5.19. Cet espace permet aux participants d'avoir accès aux résultats de la démarche ACV.

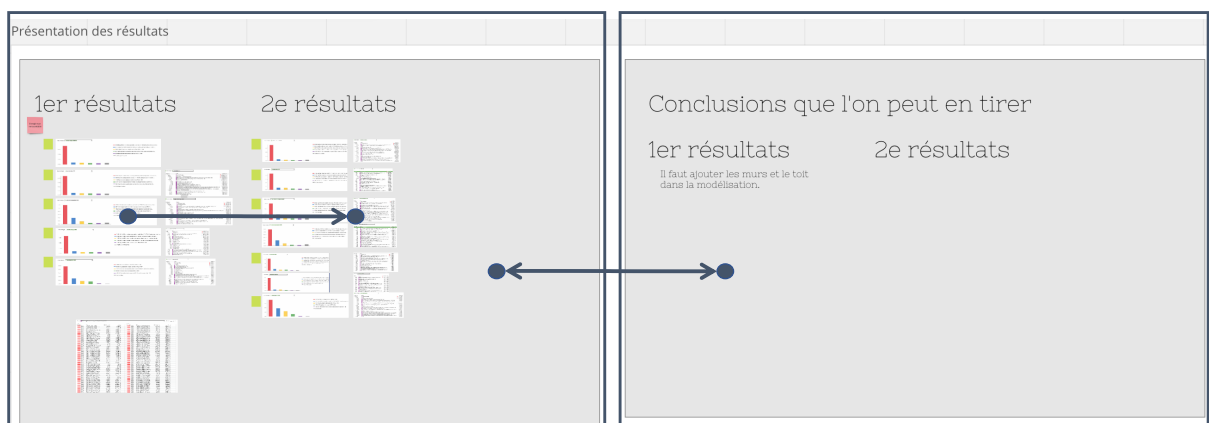


FIGURE 5.19 – Atelier résultat du prototype ACVnum

L'espace résultat est composé de deux espaces : l'un pour l'affichage des données brutes d'ACV, l'autre pour les conclusions de conception qui ont pu en être tirées par les participants.

Conclusion : Cette section a permis de présenter une tentative d'outil logiciel pour la permaingénierie. Le prototype ACVnum est une première médiatisation de la proposition de permaingénierie dans un artefact numérique.

5.3 Conclusion du chapitre 5

Cette section a permis de présenter et justifier la manière dont j'ai médiatisé les 4 caractéristiques de la permaingénierie. L'ACV a été choisie en tant que méthode d'analyse environnementale, étape d'une démarche de conception, soutenue par des outils logiciels. A partir d'une analyse des lacunes des logiciels experts d'ACV, il a été possible de montrer comment ce type de logiciel pouvait être modifié. A partir de ces critiques, j'ai proposé la conception du prototype ACVnum. Ce prototype a été ensuite testé au cours de deux expérimentations, présentées dans le chapitre suivant.

Méthodologie, expérimentations et résultats

All new technologies develop within the background of a tacit understanding of human nature and human work. The use of technology in turn leads to fundamental changes in what we do, and ultimately in what it is to be human. We encounter the deep questions of design when we recognize that in designing tools, we are designing ways of being.

[Winograd et al., 1986, p.xi]

Ce chapitre a pour objectif de présenter la manière dont la proposition de permaingénierie a été testée, les expérimentations réalisées et les résultats obtenus. La section 6.1 est dédiée à la présentation de la méthodologie choisie pour tester la proposition : la Value Sensitive Design (VSD). Il s'agit d'expliquer en quoi consiste cette méthodologie et d'expliquer pourquoi elle a été choisie (hypothèses partagées, ce que la méthode permet de mettre en évidence). Les deux sections suivantes sont dédiées à la présentation des expérimentations et des résultats obtenus : la section 6.2 pour l'expérimentation en contexte pédagogique et la section 6.3 pour l'expérimentation en contexte de soutenabilité forte. Contrairement aux précédents chapitres, il n'y a pas de section de conclusion générale car chaque expérimentation est synthétisée en fin de section.

Il est important de noter que les résultats ne vont pas être présentés selon les quatre caractéristiques de la permaingénierie, mais plutôt selon les valeurs, pratiques et compétences des parties prenantes observées lors des expérimentations. L'adéquation entre les résultats obtenus et les caractéristiques de la permaingénierie est présentée dans le chapitre 7.

6.1 Cadre méthodologique

Cette section comprend une présentation générale de la méthodologie VSD (origine, hypothèses, objectifs) afin de justifier son utilisation (section 6.1.1). Ensuite, il s'agit de discuter le traitement des valeurs dans la VSD afin d'expliquer en quoi son utilisation est compatible avec une vision contextuelle des valeurs (section 6.1.2). Puis, les 3 types d'investigations de la VSD sont présentées, ainsi que les méthodes spécifiques à la VSD utilisés dans les expérimentations (section 6.1.3). Enfin, la correspondance entre les investigations et les expérimentations est présentée (section 6.1.4).

6.1.1 Value Sensitive Design

L'objectif de cette thèse est de proposer un cadre théorique pour comprendre comment des activités d'ingénierie peuvent exister dans des contextes de soutenabilité forte. Ce cadre théorique constitue la proposition de permaingénierie. La permaingénierie est portée par des valeurs, principes et pratiques autour du *care* et de la collaboration des parties prenantes dans les projets d'ingénierie. Le moyen pour répondre à cet objectif est de comprendre les liens entre les aspects techniques des artefacts numériques d'ingénierie et les valeurs embarquées dans ces artefacts. L'hypothèse faite est que ces artefacts techniques doivent embarquer des valeurs autour du *care* et proposer des formes de collaboration entre les parties prenantes d'un projet d'ingénierie. Pour cela, la VSD est une approche prometteuse car il s'agit d'une démarche centrée sur l'explicitation des valeurs embarquées dans les technologies. Ainsi, il est possible, via la VSD de mieux comprendre comment concevoir des artefacts numériques centrés sur le *care* et les aspects collaboratifs.

La VSD s'appuie sur des méthodes issues des sciences de l'anthropologie, de la conception, des sciences organisationnelles mais également des sciences de l'informatique, et de la sociologie [Friedman et al., 2008]. Ce mélange cohérent de différentes méthodes scientifiques a son sens dans le cadre de cette thèse qui se veut être un travail interdisciplinaire.

La VSD vise à accompagner la conception de techniques. Cette méthodologie positionne différentes parties prenantes (chercheurs, designers, ingénieurs, et responsables décisionnels) côte à côte pour l'étude d'éléments technologiques et humains. La méthodologie est qualifiée d'"agnostique", c'est-à-dire qu'elle n'est pas spécifique à un type de technologie et applicable à tout type de technologie. Il est donc possible d'utiliser la VSD pour l'analyse des artefacts numériques pour l'ingénierie.

La méthodologie VSD permet d'émettre des réponses aux questions suivantes : "*How can I explore the technical and policy design space from the perspective of human values? How can I identify stakeholders and legitimate this choice? How do I elicit stakeholder views and values? How do I resolve value tensions among stakeholders? How do I translate stakeholder values into technical design decisions?*". Ainsi, cette méthodologie permet de mieux comprendre le lien entre valeurs embarquées dans les artefacts et les considérations plus techniques au niveau des artefacts numériques. La VSD peut être un moyen pour structurer notre démarche et mieux comprendre la conception d'artefacts pour la permaingénierie. De plus, les hypothèses au fondement de la VSD sont cohérentes avec les hypothèses de cette thèse :

- Les valeurs peuvent être exprimées et intégrées dans la technologie (cohérent avec notre hypothèse de la section 2.1.2) ;

- Les technologies ont des impacts réels et parfois non évidents sur ceux qui sont directement et indirectement concernés.

Les objectifs de la VSD ainsi que les hypothèses soutenant la méthode sont compatibles avec le positionnement et les objectifs scientifiques de cette thèse. La question des valeurs est centrale pour la VSD. Certains auteurs utilisant la VSD ont une approche des valeurs comme étant universelles. Étant donné que je ne soutiens pas cette approche universaliste des valeurs, il s'agit de voir si mon approche reste compatible avec la VSD. Dans la prochaine section, il s'agit de définir ce qui est compris comme une valeur pour les fondateurs de la VSD.

6.1.2 Débat sur les valeurs

Les auteurs à l'origine de la VSD ont pris le parti de dire que les valeurs sont universelles mais que la façon dont ces valeurs se manifestent diffère selon les contextes. Dans cette section, il s'agit d'expliquer que cette thèse n'est pas alignée avec cette position et pourquoi ce désaccord ne remet pas en question l'usage de la VSD.

Dans ce paragraphe, un exemple concret issu des travaux de [Friedman et al., 2008] est présenté autour du concept de "vie privée". Les fondateurs de la VSD affirment que le concept de vie privée se retrouve dans plusieurs cultures, mais n'est pas mis en oeuvre de la même manière dans une culture occidentale (avec des pièces séparées au sein d'une maison) et dans une culture non-occidentale (pas de pièces séparées mais des conventions permettant une vie privée). Les auteurs ont ensuite affirmé que bien que *certaines* valeurs étaient universelles, la façon dont ces valeurs se manifestent dans des cultures particulières diffère. Ainsi, la position des fondateurs de la VSD sur les valeurs a évolué au fil des temps, passant d'une analyse des valeurs universelles ayant une application différente selon les contextes [Friedman and Kahn Jr, 2007] à une reconnaissance du fait que seulement certaines valeurs peuvent être universelles [Friedman et al., 2006].

Ce débat autour des valeurs a eu le bénéfice de faire émerger des distinctions conceptuelles. Par exemples, les concepts de *valeur universelle* et *design universel* sont distingués : une valeur peut être partagée par des cultures sans pour autant que le design qui en découle ne soit identique dans chacune de ces cultures [Borning and Muller, 2012]. Le positionnement par rapport aux valeurs diffère selon les chercheurs utilisant la VSD. Dans les chapitres précédents, il a été vu que les valeurs d'une personne sont construites dans un contexte spécifique. Ainsi, en lien avec le positionnement adopté sur le milieu, je soutiens que les valeurs ne sont pas universelles mais dépendent des contextes.

Basé sur ce positionnement, est-il possible d'utiliser la VSD pour tester la proposition de permaingénierie ? Selon [Borning and Muller, 2012, p.3] le positionnement de la VSD est le suivant : "il devrait être possible pour un chercheur qui s'engage à respecter les valeurs universelles - ou qui s'engage à ce que toutes les valeurs soient culturellement construites - d'utiliser la VSD". Je soutiens que les valeurs partagées par plusieurs cultures ne sont pas comprises de la même manière. Ainsi, la conception d'artefacts technologiques sera différente selon les contextes. La VSD n'implique pas de design universel et permet bien la conception d'artefacts en cohérence avec les valeurs des parties prenantes d'un contexte spécifique. Étant donné ce positionnement, il est possible d'utiliser la VSD dans le cadre de ma thèse.

Les valeurs peuvent être comprises et exprimées de manières différentes selon leurs origines (quelle partie prenante les exprime par exemple). Les valeurs peuvent être des valeurs supportées par le système (technique), défendues par des parties prenantes ou même venir des concepteurs eux-mêmes. Selon la manière dont les valeurs sont exprimées (via le système, via les parties prenantes dans un contexte spécifique, via le concepteur qui est ancré dans un autre contexte), alors les valeurs ont une signification différente.

6.1.3 Trois types d'investigation

La méthodologie VSD est composée de trois types d'investigations : conceptuel, empirique et technique. Ces 3 types d'investigations sont réalisés de manière itérative et s'autoalimentent. Il n'y a pas de stricte barrière entre les 3. De plus, il est possible de commencer par n'importe laquelle des investigations. Cela se confirme avec la pratique où des études utilisant la VSD commencent avec chacune des trois investigations.

Ces 3 types d'investigations sont les suivantes :

- Les **investigations conceptuelles** correspondent aux explorations analytiques, théoriques ou philosophiques. Ces types d'investigations permettent de proposer des cadres conceptuels et d'identifier les valeurs embarquées dans des systèmes techniques. Exemples d'investigations conceptuelles : état de l'art, analyse de corpus, construction de grilles d'analyses ;
- Les **investigations empiriques** permettent de réaliser des récoltes de données dans des contextes réels, où la technologie est dans son milieu (située). Les données récoltées sont par exemple : quelles sont les parties prenantes impliquées, les valeurs importantes pour ces parties prenantes et la manière de les prioriser. Exemples d'investigations empiriques : entretiens, questionnaires, *focus group* ;
- Les **investigations techniques** se focalisent sur les propriétés techniques existantes (ou celles à développer) et les liens avec les valeurs. Exemples d'investigations techniques : prototypage, développement produit.

Les fondateurs de la VSD ont listé des méthodes utilisées dans le cadre de la méthodologie. Ces méthodes ont fait leurs preuves dans leur utilité pour faire émerger des valeurs en lien avec le système technique, les parties prenantes et le chercheur. Il ne s'agit pas de reprendre l'ensemble des méthodes (au nombre de 17) présentées dans [Friedman and Hendry, 2019, p.61-64] mais uniquement de présenter les trois méthodes principalement utilisées dans mes deux expérimentations. Ces trois méthodes sont :

- Des entretiens semi-structurés axés sur les valeurs (pour l'explication des valeurs supportées par les parties prenantes)
- Un codage manuel axé sur les valeurs (pour l'analyse des entretiens axés sur les valeurs)
- Une enquête ethnographique sur les valeurs et la technologie (pour comprendre le lien entre les valeurs, la technologie, la structure sociale de la communauté étudiée)

Les investigations font intervenir différents types de parties prenantes : directes et indirectes. Les parties prenantes directes interagissent avec le système. Ainsi, les parties prenantes indirectes n'interagissent pas directement avec le système mais sont affectées par lui. Je reviendrai sur les parties prenantes directes et indirectes dans la description

des enquêtes et dans les analyses, étant donné qu'il n'a pas été possible de réellement intégrer des parties prenantes indirectes dans les enquêtes.

En plus d'une analyse des valeurs, une analyse des données sur les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité sera conduite. Les compétences n'apparaissent pas dans la VSD et seront pourtant très présentes dans les enquêtes (protocole, récolte et traitement des données) car il s'agit d'un composant essentiel de cette thèse. En complément des entretiens axés sur les valeurs, des questionnaires basés sur les compétences ont été réalisés. Je fais l'hypothèse que l'usage d'artefacts numériques d'ingénierie pour la soutenabilité peut être facilitée si les valeurs des usagers et leurs compétences sont alignées avec des objectifs de soutenabilité forte. Cette hypothèse va être très forte dans l'expérimentation en contexte d'apprentissage.

6.1.4 Correspondance entre les investigations et les expérimentations

La VSD est un cadre pour structurer mes expérimentations. Dans chaque expérimentation, il est possible d'y retrouver des investigations conceptuelles, empiriques et techniques. Le tableau 6.1 résume les objectifs et types d'investigations pour chaque expérimentation.

Dans l'expérimentation dans un contexte pédagogique en ingénierie, une étude comparative a été menée entre des groupes mobilisant le prototype ACVnum et d'autres ne le mobilisant pas. L'objectif général est d'observer si des différences entre les deux types de groupes émergent au cours de l'utilisation du logiciel, sur une période de 3 mois. Cette expérimentation a commencé avec des investigations empiriques et conceptuelles : la réalisation du prototype ACVnum (technique) et des recherches sur les aspects collaboratifs autour des logiciels d'ACV (conceptuel). Les investigations empiriques sont venues dans un deuxième temps et ont consisté en des entretiens collectifs (par groupes projets) autour du logiciel utilisé et des questionnaires sur les compétences.

Dans l'expérimentation dans un contexte de soutenabilité forte, la perspective est différente car elle a été réalisée de manière immersive, dans une communauté en transition écologique (un éco-hameau¹). L'investigation technique a été identique à l'expérimentation en situation d'apprentissage d'ingénierie. Cette expérimentation se rapproche d'une étude ethnographique car elle a duré plus de 6 mois, avec des périodes d'immersion dans le contexte étudié. Les investigations empiriques ont consisté en des entretiens individuels, des sessions de travail avec un *focus group*, ainsi que des observations générales sur le fonctionnement de la communauté.

La figure 6.1 représente le cheminement suivi, depuis la question de recherche ciblée adressée aux connaissances produites, en passant par les différentes méthodes mises en oeuvre pour collecter des données (types, objectifs et formats des analyses mises en oeuvre sur les données). Ce schéma permet de montrer que les analyses ont été structurées en trois parties : valeurs, pratiques et compétences. Les deux expérimentations ont permis d'adresser ces trois parties, parfois de manière complémentaire (pour les compétences et les pratiques). L'ensemble des analyses sont centrées sur l'usage du prototype ACVnum par les parties prenantes et leurs réactions.

1. Pour rappel, un éco-hameau est une agglomération rurale qui s'organise autour de trois éléments majeurs : un modèle économique alternatif, un mode de vie autour de l'écologie et une vie communautaire active. Les situations expérimentales étaient proches de situations de recherche-actions.

TABLE 6.1 – Correspondance entre les investigations et les enquêtes de terrain

	Expérimentation dans un cadre pédagogique en ingénierie	Expérimentation dans un contexte de soutenabilité forte
Objectif de l'expérimentation	Comprendre quels types d'artefacts numériques seraient compatibles avec les valeurs, pratiques et compétences des acteurs potentiels de la permaingénierie.	Comprendre comment les artefacts numériques d'ingénierie pour la soutenabilité peuvent s'intégrer dans un contexte de soutenabilité forte.
Cadre général	Comparaison : Expérimentation comparative entre des groupes utilisant des artefacts numériques différents dans une pratique d'ingénierie pour la soutenabilité. Comparaison sur les compétences et les interactions avec les parties prenantes.	Immersion : Expérimentation en immersion au sein d'un éco-hameau, via un <i>focus group</i> regroupé autour d'une analyse de cycle de vie sur des tiny houses. Comprendre les adéquations entre les valeurs des habitants de l'éco-hameau et l'usage du prototype ACVnum.
Investigations conceptuelles	État de l'art : Compétences d'ingénierie pour la soutenabilité État de l'art : Impact de l'aspect collaboratif sur les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité. État de l'art : Définition de l'ingénierie pour la soutenabilité	État de l'art : Adéquation entre la pratique ACV et l'organisation d'un éco-hameau. État de l'art : Adéquation entre les systèmes numériques et l'organisation sociale d'un éco-hameau.
Investigations empiriques	Questionnaires individuels : Comprendre l'évolution des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité à 3 moments différents d'une pratique d'ingénierie pour la soutenabilité. Entretiens collectifs : Comprendre l'aspect collaboratif avec le commanditaire de l'ACV. Identification des blocages dans les relations avec les parties prenantes, via l'artefact numérique (pour deux types de groupes). Entretiens collectifs : Retour sur l'usage du prototype ACVnum pour les groupes l'utilisant et échange sur les manques dans l'usage d'openLCA.	Entretiens individuels orientés sur les valeurs : Comprendre les valeurs animant les participants du <i>focus group</i> (<i>motivational interviews</i>). Questionnaires individuels : Comprendre l'état des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité avant la mise en oeuvre de la démarche ACV. Sessions de travail collectif : Comprendre les dynamiques collectives au sein d'un groupe de travail sur l'ACV. Étude ethnographique sur les valeurs et la technologie : observations en immersion dans l'éco-hameau.
Investigations techniques	Prototype : Conception d'un prototype intégrant des aspects collaboratifs au sein de la méthode ACV, via un logiciel support. Usage au sein de 4 groupes projets sur 8.	Prototype : Conception d'un prototype intégrant des aspects collaboratifs au sein de la méthode ACV, via un logiciel support. Usage au sein d'un <i>focus group</i> .

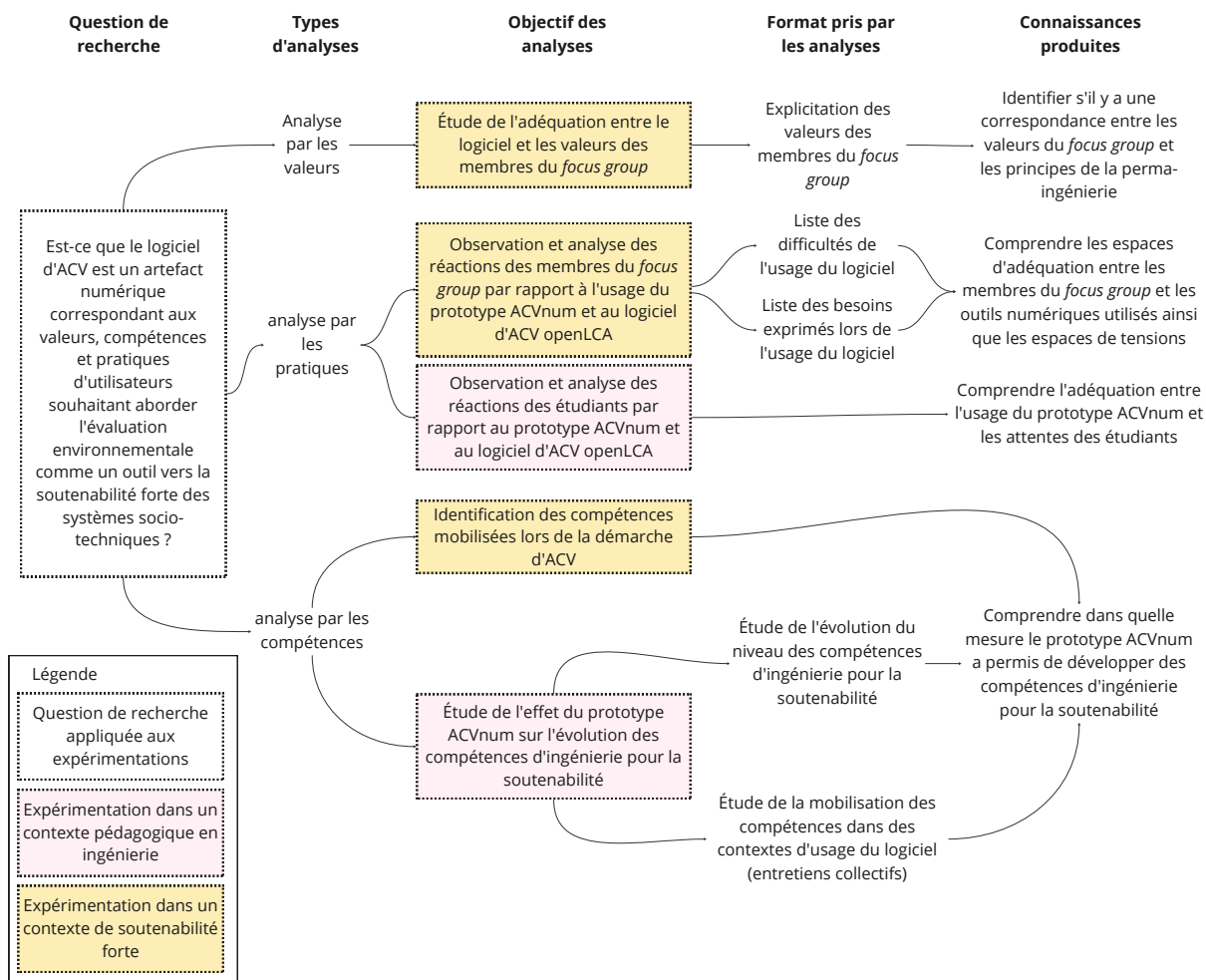


FIGURE 6.1 – Correspondance entre les analyses réalisées et les connaissances produites

La figure se lit de gauche à droite. Depuis la question de recherche, trois types d'analyses ont été réalisées (valeurs, pratiques, compétences). Chaque analyse est reliée à une ou plusieurs études menées (études ou observations). Ces études sont décrites dans la colonne "objectif des analyses" (car chaque étude est exprimée en fonction d'un objectif). Ces analyses ont pris des formats particuliers (décrits dans la colonne "Format pris par les analyses") et ont produit différents types de connaissances (décrits dans la colonne "Connaissances produites"). Ce sont ensuite ces connaissances qui sont discutées en fonction des caractéristiques de la perma-ingénierie dans le chapitre 7.

La section 6.2 va présenter l'expérimentation dans un contexte pédagogique en ingénierie et la section 6.3 va présenter celle en contexte de soutenabilité forte.

6.2 Expérimentation en contexte d'apprentissage en ingénierie

Cette section est composée d'une présentation de l'expérimentation, des résultats obtenus et de la synthèse des résultats (en lien avec les questions et objectifs de recherche).

6.2.1 Présentation de l'expérimentation

Cette sous-section est composée d'une description de l'expérimentation, une présentation des hypothèses testées, de la récolte de données et de la méthode de traitement des données choisies.

Description

Dans cette expérimentation, il s'agit de comparer deux types de groupes projets mobilisant la méthodologie ACV et utilisant des logiciels d'ACV différents. L'objectif de cette expérimentation est de comprendre quels types d'artefacts numériques sont compatibles avec les valeurs et pratiques des acteurs de la permaingénierie. Pour cela, j'ai identifié une classe d'étudiants en master, au sein de l'Université de technologie de Troyes, formés aux enjeux de soutenabilité avec une forte composante ingénierie / technologie.

La classe a été divisée en 8 groupes de 4 / 5 étudiants. Chaque groupe devait réaliser une démarche d'analyse de cycle de vie pour une organisation (nommé commanditaire dans la suite des chapitres). Au cours de cette démarche, 4 groupes devaient utiliser un outil d'ACV nommé openLCA, tandis que les 4 autres groupes devaient utiliser openLCA et le prototype nommé ACVnum, support à la collaboration entre le groupe projet et le commanditaire du groupe. Comme expliqué dans la section ??, un logiciel d'ACV a été choisi pour les expérimentations. Ainsi, je devrais observer des tensions entre l'usage du logiciel d'ACV et les valeurs portées par les usagers.

Cette expérimentation comparative est la suivante :

- 4 groupes avec l'usage d'un outil conventionnel (openLCA) aussi appelés **groupes témoins** ;
- 4 groupes avec l'usage d'un outil conventionnel (openLCA) et d'un artefact numérique médiatisant les principes de la permaingénierie aussi appelés **groupes ACV-num**.

TABLE 6.2 – Répartition des groupes et des outils numériques utilisés

N°	Type de commanditaire	Système technique	Type de groupe
1	Collectif en transition	Parc photovoltaïque	Témoin
2	Collectif en transition	Système de traitement des eaux	Témoin
3	Collectif en transition	Système d'isolation du bâti	ACVnum
4	Entreprise	Système de protection des vignes	ACVnum
5	Entreprise	Système de serre verticale	Témoin
6	Entreprise	Housse orthopédique	Témoin
7	Association	Système de gestion de chaleur	ACVnum
8	Pas de structure	Frigo basse consommation	ACVnum

Ces groupes projets ont travaillé sur une durée de 4 mois. Chaque groupe projet était composé de 4 ou 5 étudiants en dernière année de master et avaient un commanditaire (entreprise, collectif, enseignant). L'expérimentation consiste à comparer la manière dont

les groupes projets conduisent leur ACV et s'il existe des différences entre les groupes témoins et les groupes ACVnum.

L'attribution de la caractéristique "témoin" ou "ACVnum" a été réalisée de manière aléatoire à chaque groupe projet. La répartition des caractéristiques des groupes est décrite dans le tableau 6.2. Une des caractéristiques communes aux groupes est qu'ils étaient interdisciplinaires puisque composés d'étudiants issus : de cursus d'ingénieurs, de cursus littéraires, de cursus autour des sciences naturelles (biologie par exemple), de cursus qualité et environnement.

Hypothèses testées

Les hypothèses posées et testées dans le cadre de cette enquête sont les suivantes :

- Hypothèse 1 (H1) : les étudiants utilisant le prototype ACVnum ont une acquisition plus forte en Qu3 des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité (issus de [Quelhas et al., 2019]) que les étudiants sans le prototype ACVnum.
- Hypothèse 2 (H2) : les étudiants ayant une culture autour des enjeux de soutenabilité sont dans l'attente de méthodes et outils d'ingénierie propices à la collaboration entre les parties prenantes.

H0₁ est : les groupes ACVnum et témoins sont équivalents à la fin du semestre (nommé Qu3 en figure).

H1 est testée grâce à une analyse mixte quantitative (statistique) et qualitative. H2 est testée uniquement via une analyse qualitative.

Récolte de données

Les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité de [Quelhas et al., 2019] ont servi de grille de comparaison entre les deux types de groupes. Tous les étudiants se sont positionnés au niveau des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité avant (Qu1), pendant (Qu2) et après (Qu3) le lancement de la démarche d'analyse environnementale. Les moments d'autoévaluation et les activités pédagogiques sont représentés dans la figure 6.2. Cette auto-évaluation a permis de suivre l'évolution des compétences des étudiants en fonction des activités réalisées au cours du semestre.

Chaque étudiant de chaque groupe a rempli un questionnaire sur les compétences d'ingénierie, avec 5 niveaux repris de [de l'enseignement, 2011], que je représente ici :

- Niveau 0 : je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : je comprends ce qu'est la compétence, mais je ne peux pas en parler.
- Niveau 2 : je comprends ce qu'est la compétence et je peux en parler.
- Niveau 3 : j'ai pratiqué la compétence au moins une fois.
- Niveau 4 : je maîtrise des outils techniques et méthodologiques en lien avec cette compétence.
- Niveau \emptyset : Je ne sais pas.

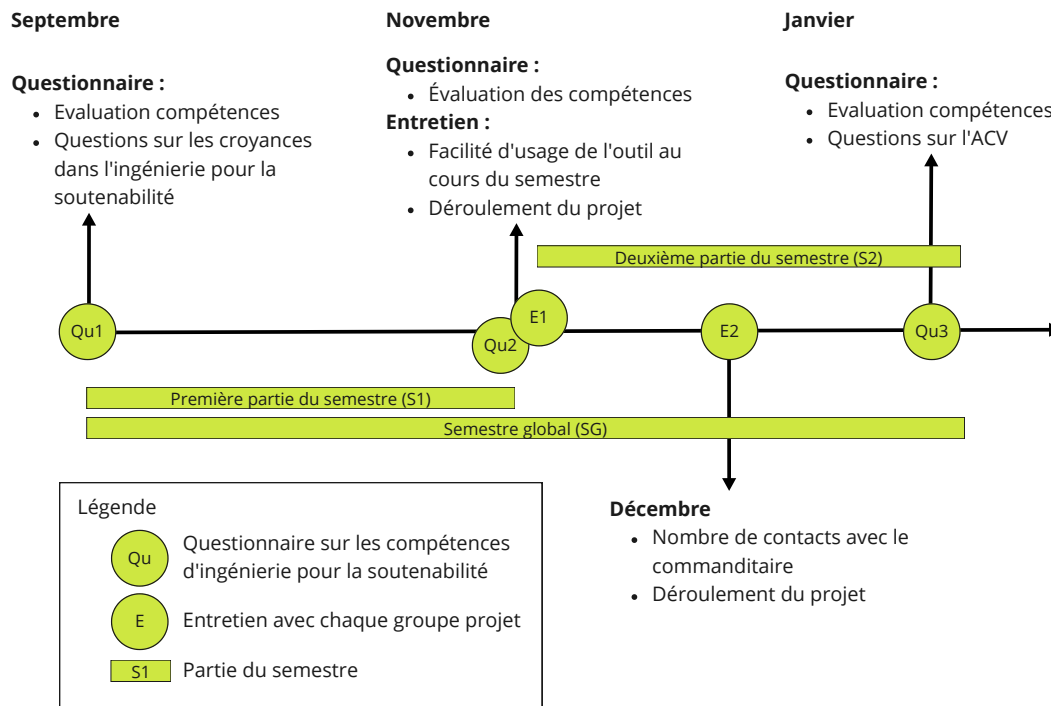


FIGURE 6.2 – Chronologie autour de la récolte de données dans un contexte pédagogique

La figure représente une chronologie afin de montrer à quels moments les questionnaires (Qu1, Qu2, Qu3) et entretiens (E1, E2) ont été réalisés auprès des étudiants.

Ainsi, chaque étudiant a rempli un questionnaire pour se situer sur les 8 compétences d'ingénierie pour la soutenabilité à 3 moments du semestre. La figure 6.2 reprend la temporalité de cette récolte de données. En septembre, les étudiants ont rempli un questionnaire sur l'évaluation des compétences (2 questions par compétences : une sur le niveau et une sur des exemples pour justifier le positionnement) et 4 questions sur leur parcours professionnel, leur engagement sur les questions écologiques, l'ingénierie et l'ACV (défini comme "questions sur les croyances dans l'ingénierie pour la soutenabilité" dans la figure 6.3). En novembre, le questionnaire a uniquement porté sur les compétences (positionnement selon les niveaux et un champ libre par compétences pour les exemples potentiels). En janvier, le questionnaire était composé des questions sur les compétences et de questions de "clôture" : "Est-ce que la place de l'écologie dans votre vie a évolué suite [aux enseignements de ce semestre]? Comment?" et "Après 4 mois à apprendre ce qu'est l'ACV, pour vous, quelle est la place de l'ACV dans la transition écologique?". Les 3 questionnaires sont disponibles en 9.1.

De plus, chaque groupe a participé à deux entretiens pour évoquer leurs avancées dans leur analyse environnementale. Ces entretiens groupés ont eu lieu en visioconférence.

Les données récoltées sont donc :

- Les réponses aux questionnaires Qu1, Qu2 et Qu3 sur les compétences ainsi que des questions complémentaires posées lors du questionnaire en septembre et en janvier (données qualitatives et quantitatives) ;
- Les données issues des entretiens E1, E2 : répliques, rencontres avec les commanditaires, questionnements, doutes, etc (données qualitatives et quantitatives).

Méthode de traitement des données

Les données récoltées étant hétérogènes, différents types d'analyses ont été effectués. Cette section permet de présenter et justifier les différents traitements réalisés sur les données brutes récoltées. La figure 6.3 permet de relier les hypothèses aux types de données récoltées et aux traitements effectués sur ces données.

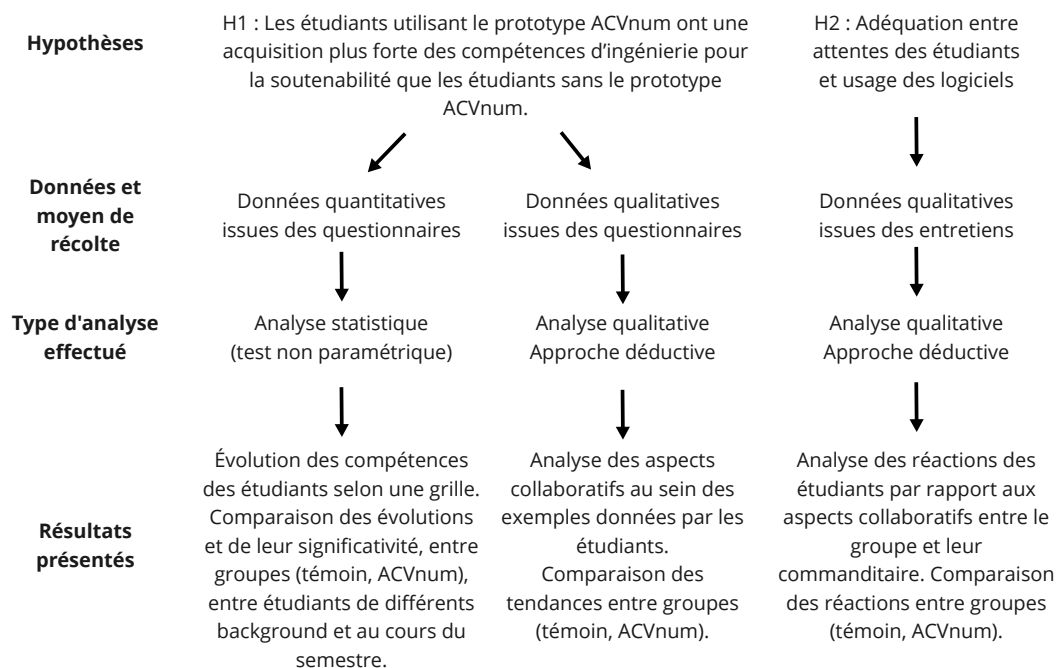


FIGURE 6.3 – Représentation des types de traitements de données et résultats obtenus pour chaque type de données

La figure comporte quatre lignes et se lit de haut en bas. Chaque hypothèse (H1 et H2 sur la première ligne) est associée à un corpus de données (qualitatives, quantitatives) précis. Les données de ces corpus sont analysées, soit de manière statistique, soit avec une approche qualitative. Les résultats attendus issus de ces analyses sont résumés sur la ligne "résultats présentés".

Des tests statistiques ont été effectués sur les données quantitatives recueillies par le biais des questionnaires. Les valeurs 0, 1, 2, 3, 4 ont été attribuées aux différents niveaux d'acquisition des compétences (voir annexe 9.1.4 pour les détails). Les réponses "je ne sais pas" ont été remplacées par une moyenne des réponses numériques (imputation par la moyenne).

Un test de normalité a été réalisé sur les données. Les données ne suivant pas une loi normale, un test non-paramétrique² a été sélectionné, plus précisément le test de Wilcoxon-Mann-Whitney. Ce test permet de comparer de petits échantillons ($n < 30$) indépendants. Ainsi, cela permet de comparer les groupes ACVnum et les groupes témoins. L'hypothèse nulle (H_{01}) du test suppose que les médianes sont égales (pas de différence entre les groupes ACVnum et témoins), alors que l'hypothèse alternative (H1) suppose que les médianes (des groupes ACVnum et témoins) ne sont pas égales.

2. Les tests paramétriques supposent que les données suivent une loi normale.

De plus, un test des rangs signés de Wilcoxon a été réalisé afin de comprendre l'évolution de chaque types groupe (ACVnum et témoin) à Qu1, Qu2 et Qu3.

Les calculs statistiques ont été fait via le logiciel Jamovi.

Une analyse qualitative de type déductive³ a été réalisée sur les données qualitatives issues des questionnaires et des entretiens (sur le logiciel NVivo). Les quatre catégories pour l'analyse qualitative déductive sont les suivantes :

- Catégorie 1 : La collaboration entre les groupes d'étudiants et leur commanditaire via la réalisation d'une ACV ;
- Catégorie 2 : Le rôle des outils numériques dans la démarche ;
- Catégorie 3 : Les moments de rencontre entre la démarche ACV et les compétences ;
- Catégorie 4 : Lien entre les compétences exprimés par les étudiants.

La prochaine section est dédiée aux résultats obtenus grâce au traitement des données.

6.2.2 Résultats issus des questionnaires sur les compétences

Cette partie est structurée autour de 3 sous-parties : (1) le positionnement de la population par rapport aux objectifs de transition écologique, (2) les données quantitatives (3) le croisement des données qualitatives et quantitatives par compétence⁴. L'ensemble de cette section permet de répondre à H1.

Positionnement de la population par rapport aux objectifs de transition écologique

Les données sur le positionnement des étudiants par rapport aux enjeux écologiques sont disponibles dans le tableau 6.3.

Les 38 étudiants se sont positionnés par rapport aux enjeux écologiques. 8 étudiants considèrent que l'écologie est réservée à leur domaine personnel, 3 étudiants considèrent que l'écologie concerne uniquement leur sphère professionnelle. 27 étudiants considèrent que l'écologie est un élément structurant de leur vie personnelle et professionnelle. Ainsi, l'enquête est réalisée chez des étudiants sensibles et engagés dans les enjeux écologiques. J'ai fait l'hypothèse que cette population a une maturité sur ces enjeux et est en phase avec une culture de la soutenabilité forte. Il s'agit donc de comprendre si les artefacts numériques utilisés au cours de cette expérimentation sont en phase avec les valeurs des étudiants.

TABLE 6.3 – Engagement chez les 38 répondants au questionnaire

L'écologie fait partie de mon engagement...	Nombre d'étudiants
... Personnel	8
... Professionnel	3
... Personnel et professionnel	27

3. Une analyse déductive est une analyse qui débute par la formalisation d'une (ou plusieurs) hypothèses qui sont testées

4. Dans un objectif d'ouverture des données scientifiques, les données quantitatives brutes issus des questionnaires sur les compétences sont disponibles à l'adresse suivante : https://github.com/GIS-S-mart/Benchmark-4_Sustainability_Competerences_LCA/blob/main/README.md.

Également, j'ai relevé l'attitude des étudiants envers la technologie avec la question suivante : Pensez-vous que la technologie va permettre de résoudre les problématiques écologiques ? Pourquoi ? Quelle est pour vous la place de l'ingénieur dans cette transition écologique ?

Ces données sont traduites dans le tableau 6.4 en fonction du positionnement (optimisme, pragmatisme ou scepticisme) des étudiants. La définition des termes optimisme, pragmatisme et scepticisme correspond aux trois catégories de [Seager et al., 2012] qu'il est possible de retrouver dans le chapitre 4.

Deux réponses ne comportaient pas assez d'éléments pour être catégorisées.

TABLE 6.4 – Attitude des 38 étudiants envers la technologie

Attitude envers la technologie	Nombre d'étudiants
Optimisme	1
Pragmatisme	8
Scepticisme	27
Pas assez d'information pour préciser le positionnement	2

Ces résultats permettent de confirmer que le contexte d'étude est proche d'un contexte d'étude des *sciences de l'ingénierie soutenable* (compréhension de la soutenabilité comme un problème complexe, scepticisme envers la technologie compris comme une solution à la soutenabilité, volonté d'intégrer les parties prenantes dans des projets d'ingénierie, l'innovation est perçue comme positive lorsqu'elle répond à un besoin).

Description des données quantitatives issus des questionnaires

Dans cette partie, je m'intéresse à la progression des groupes utilisant le prototype ACVnum en plus du logiciel classique openLCA (groupes ACVnum), par comparaison avec les groupes témoins. Dans cette section, les résultats sont décrits via des graphiques et des tableaux. Quatre types de résultats quantitatifs vont être présentés. Tout d'abord, (1) je vais présenter la répartition des réponses des étudiants (diagrammes 5.4 et 5.5). Ensuite, (2) je vais présenter les moyennes et écarts-types des résultats (tableau 6.5). Puis, (3) je présenterai la significativité des tests statistiques Mann-Whitney U permettant de comparer les groupes ACVnum et groupes témoins (tableau 6.6). Enfin, (4) je présenterai la significativité des tests des rangs signés de Wilcoxon permettant de comprendre si les groupes ACVnum et les groupes témoins ont progressé entre Qu1 et Qu3 (tableau 6.7).

C'est uniquement dans la section suivante que je croiserai les résultats quantitatifs avec les données qualitatives correspondantes. En effet, les résultats quantitatifs seront décrits dans la section suivante pour chaque compétence et corrélés aux données qualitatives.

(1) Répartition des réponses des étudiants

Les figures 5.4 et 5.5 présentent la répartition des réponses des étudiants (le niveau choisi) pour les 3 questionnaires Qu1, Qu2, Qu3 pour les compétences "Travail dans un groupe interdisciplinaire" pour chaque type de groupe.

Travail dans un groupe interdisciplinaire - groupes ACVnum

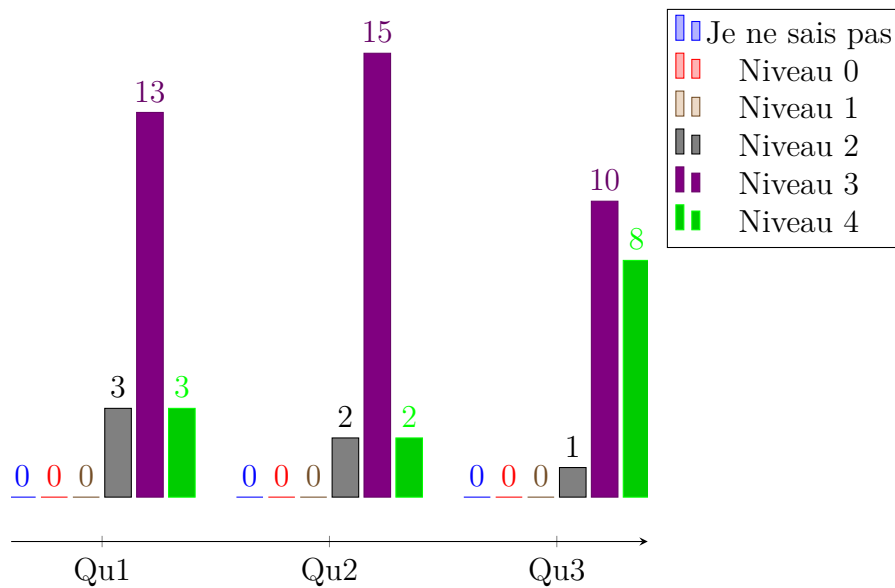


FIGURE 6.4 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire"

Travail dans un groupe interdisciplinaire - groupes témoins

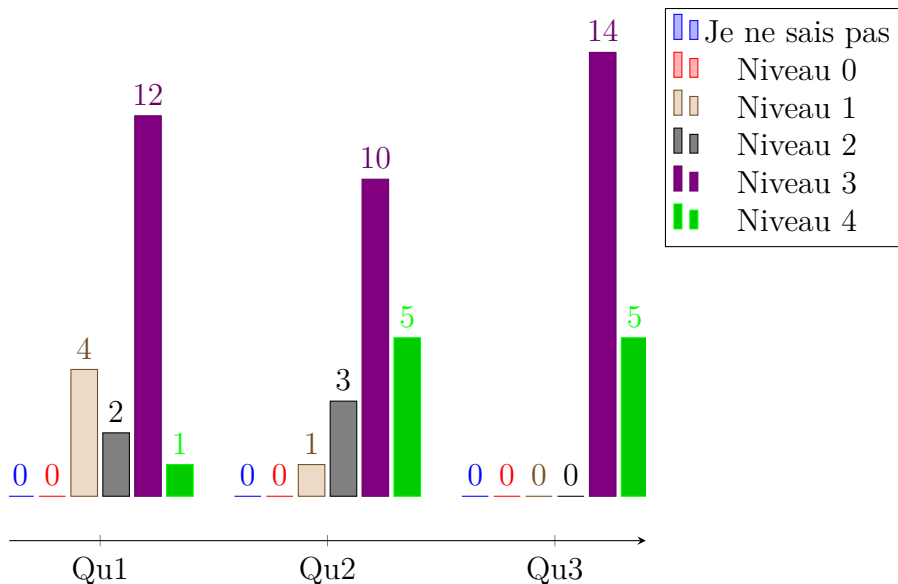


FIGURE 6.5 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire"

Ainsi, grâce à ces diagrammes, il est possible de voir l'évolution des réponses des étudiants par compétence. La figure 4.4 se lit de la manière suivante : pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire", sur les 19 étudiants répartis dans les groupes ACVnum, pour le 1er questionnaire (Qu1), 3 étudiants se sont autoévalués au niveau 2,

13 étudiants au niveau 3 et 3 étudiants au niveau 4. Pour le 2e questionnaire (Qu2), 2 étudiants se sont auto-évalués au niveau 2, 15 au niveau 3 et 2 au niveau 4. Pour le 3e questionnaire, 1 étudiant s'est positionné au niveau 2, 10 au niveau 3 et 8 au niveau 4. Ainsi, le nombre d'étudiants au niveau 2 au fil des questionnaires a diminué (passant de 3 à 1) et le nombre d'étudiants au niveau 4 a augmenté (passant de 3 à 8).

Par comparaison, il est possible de voir qu'il y a une répartition des réponses plus large au niveau des groupes témoins, avec 4 étudiants au niveau 1 (donc 4 étudiants qui comprennent ce qu'est l'interdisciplinarité mais qui ne sont pas capable d'en parler) pour 0 dans les groupes ACVnum.

(2) Moyennes et écarts-types des résultats par compétences en fonction des groupes

TABLE 6.5 – Moyennes et écarts-types de chaque questionnaire (Qu1, Qu2 et Qu3) pour les groupes ACVnum

Compétence	Questionnaire	Moyenne ACVnum	Écart-type ACVnum	Moyenne Témoins	Écart-type Témoins
Travail dans un groupe interdisciplinaire	Qu1	3.000	0.577	2.526	0.905
	Qu2	3.000	0.471	3.000	0.816
	Qu3	3.368	0.597	3.263	0.452
Esprit critique	Qu1	2.789	0.787	2.421	0.692
	Qu2	3.000	0.667	2.737	0.562
	Qu3	3.368	0.597	3.316	0.671
Compétence normative	Qu1	1.750	1.000	1.526	0.905
	Qu2	2.333	1.029	2.263	0.872
	Qu3	2.667	0.970	2.579	0.902
Résoudre des problèmes	Qu1	2.263	0.933	2.158	0.834
	Qu2	2.947	0.621	3.053	0.848
	Qu3	3.368	0.597	3.579	0.507
Pensée systémique	Qu1	2.368	0.831	2.579	0.838
	Qu2	3.053	0.621	3.000	0.667
	Qu3	3.368	0.597	3.278	0.669
Connaissance de soi	Qu1	2.211	1.084	2.684	0.946
	Qu2	2.632	1.012	3.105	0.875
	Qu3	3.105	0.809	3.211	0.535
Contextualisation et vision du futur	Qu1	1.944	1.162	1.895	0.937
	Qu2	2.556	0.705	2.263	0.806
	Qu3	3.053	0.970	3.053	0.911
Compétence stratégique	Qu1	1.579	1.017	1.579	1.017
	Qu2	2.471	0.824	2.158	0.834
	Qu3	2.556	0.856	2.895	0.809

Le tableau 6.5 décrit les moyennes et écart-types des réponses des étudiants répartis dans les groupes ACVnum et témoins. Pour le questionnaire 1 (Qu1), pour la compétence interdisciplinarité, la moyenne des réponses des groupes ACVnum est de 3 et l'écart-type de 0.577. Pour les groupes témoins, cette moyenne est de 2.526, avec un écart-type de 0.905. Ainsi, il est possible de voir que le niveau de départ des groupes ACVnum et témoins n'est pas équivalent pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire". En effet, la moyenne des groupes ACVnum est plus haute avec un écart-type plus faible. Plus l'écart-type est faible, plus les réponses sont homogènes. Cela se confirme par la répartition des réponses (graphiques 4.3 et 4.4) où 4 étudiants des groupes témoins se sont mis au niveau 1, et seulement 1 au niveau 4 (contre 0 étudiants des groupes ACVnum au niveau 1 et 3 au niveau 4). Par contre, il est possible de voir que le niveau des deux groupes s'est rapproché car à Qu3, les groupes ACVnum ont une moyenne de 3.368 et un écart-type de 0.597 et les groupes témoins ont une moyenne de 3.262 avec un écart-type plus faible à 0.452. Il est également possible de voir que la quasi totalité des étudiants des deux groupes se positionnent aux niveaux 3 et 4 de cette compétence à la fin du semestre (Qu3), avec seulement 1 étudiant au niveau 2.

Il est possible de voir une augmentation des moyennes de toutes les compétences (Qu1 < Qu2 < Qu3) pour tous les groupes (ACVnum et témoins). Les écarts-types varient entre 0.452 et 1.162. Les moyennes et les écarts-types des questionnaires Qu1, Qu2 et Qu3 pour les groupes ACVnum et les groupes témoins sont représentés sous la forme de graphiques en annexe 9.2.

(3) Tests statistiques pour comparer les groupes ACVnum et témoins

Le tableau 6.6 donne la significativité⁵ des tests réalisés sur les données quantitatives entre les groupes ACVnum et les groupes témoins. Comme il est possible de le voir, aucune p-valeur n'est inférieure à 0.05. Ainsi, l'hypothèse H_0 est conservée.

Table 6.6: Significativité (p) des tests Mann-Withney pour comparer les groupes ACVnum et Témoin

Compétence	Questionnaire	p-valeur
Travail dans un groupe interdisciplinaire	Qu1	0.115
	Qu2	0.808
	Qu3	0.466
Esprit critique	Qu1	0.082
	Qu2	0.105
	Qu3	0.870
Compétence normative	Qu1	0.486
	Qu2	0.795
	Qu3	0.620
Résoudre des problèmes	Qu1	0.666
	Qu2	0.517

Continued on next page

5. Si les résultats sont significatifs, c'est-à-dire que la valeur p est inférieure à 0.05, alors l'hypothèse nulle (selon laquelle les groupes sont identiques) est probablement rejetée. Dans notre cas, cela signifie que les groupes ACVnum et témoins ne sont pas différents.

Table 6.6: Significativité (p) des tests Mann-Withney pour comparer les groupes ACVnum et Témoin (Continued)

Compétence	Questionnaire	p-valeur
	Qu3	0.287
Pensée systémique	Qu1	0.563
	Qu2	0.815
	Qu3	0.771
Connaissance de soi	Qu1	0.225
	Qu2	0.146
	Qu3	0.866
Contextualisation et vision du futur	Qu1	0.890
	Qu2	0.164
	Qu3	0.950
Compétence stratégique	Qu1	1.000
	Qu2	0.244
	Qu3	0.279

(4) Tests statistiques pour comparer l'évolution des groupes entre Qu1, Qu2 et Qu3

Table 6.7: Significativité (p) des tests des rangs signés de Wilcoxon réalisées sur les deux parties du semestre et sur le semestre global pour la classe entière et chaque type de groupe (ACVnum et témoin)

Compétence	Sections du semestre	Classe entière	Groupe ACV-num	Groupe Témoin
Travail dans un groupe interdisciplinaire	S1	0.067	1,000	0.071
	S2	0.003	0.011	0.003
	SG	<0.001	0.059	<0.001
Esprit critique	S1	0.028	0.240	0.071
	S2	<0.001	0.011	0.003
	SG	<0.001	0.005	<0.001
Compétence normative	S1	<0.001	0.032	<0.001
	S2	0.036	0.138	0.179
	SG	<0.001	<0.001	0.002
Résoudre des problèmes	S1	<0.001	0.003	0.004
	S2	<0.001	0.006	0.033
	SG	<0.001	<0.001	<0.001
Pensée systémique	S1	<0.001	0.009	0.024
	S2	0.016	0.041	0.172
	SG	<0.001	<0.002	0.008

Continued on next page

Table 6.7: Significativité (p) des tests des rangs signés de Wilcoxon réalisées sur les deux parties du semestre et sur le semestre global pour la classe entière et chaque type de groupe (ACVnum et témoin) (Continued)

Compétence	Sections du semestre	Classe entière	Groupe ACV-num	Groupe Témoin
Connaissance de soi	S1	0.005	0.052	0.050
	S2	0.103	0.123	0.608
	SG	<0.001	0.003	0.015
Contextualisation et vision du futur	S1	0.018	0.054	0.210
	S2	<0.001	0.029	0.006
	SG	<0.001	0.002	0.001
Compétence stratégique	S1	<0.001	0.003	0.013
	S2	0.024	0.717	0.013
	SG	<0.001	0.003	<0.001

Le test des rangs signés de Wilcoxon permet de définir si les groupes ont évolué au cours du semestre. Grâce aux données du tableau 6.7, il est possible de voir que certains groupes ont plutôt progressé au cours de la première partie du semestre (S1) ou au cours de la seconde partie du semestre (S2).

Par exemple, pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire", pour la première partie du semestre et les étudiants répartis dans les groupes ACVnum, le test montre un p-valeur de 1. La valeur étant supérieure à 0.05, l'hypothèse d'une différence entre Qu1 et Qu2 n'est pas vérifiée sur cette compétence pour les étudiants des groupes ACVnum. Pour la compétence esprit critique pour les groupes ACVnum, nous pouvons lire dans le tableau que la p-valeur est de 0.005 ($p < 0.05$) pour le semestre global (SG). Ainsi, il est possible de dire que le niveau des groupes ACVnum a significativement progressé entre Qu1 et Qu3.

Mise en lien des données quantitatives et qualitatives par compétence

Je vais présenter les résultats quantitatifs et qualitatifs permettant de comparer les groupes témoins et les groupes ACVnum. Les résultats quantitatifs se trouvent dans le tableau 6.7. Ce tableau permet de comparer les dynamiques d'évolution des deux groupes (ACVnum et Témoin). Les résultats qualitatifs vont permettre de compléter les résultats quantitatifs. Chaque compétence va être présentée en deux parties, avec les données quantitatives d'une part et les données qualitatives d'autre part. Les données qualitatives seront présentées en quatre "catégories" : (a) la collaboration entre les groupes d'étudiants et leur commanditaire via la réalisation d'une ACV, (b) le rôle des outils numériques dans la démarche ACV, (c) les moments de rencontre entre la démarche ACV et les compétences, (d) les liens entre les compétences. Une conclusion centrée sur la mention des outils numériques dans la montée en compétence sera faite sur chaque compétence. Un bilan est disponible (dans les encadrés) pour chaque compétence.

Travail dans un groupe interdisciplinaire

Pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire", le type groupe ACVnum a davantage progressé sur la 2e partie du semestre (S2 avec $p=0.011$) que sur la

première partie du semestre (S1 avec $p=1.000$). La progression pour les groupes ACVnum entre le début et la fin du semestre n'est pas significative mais un progrès tendantiel est noté ($p=0.059$). Les groupes témoins ont une différence significative entre Qu1 et Qu3 (SG) avec un $p<0.001$. De plus, la différence entre Qu1 et Qu2 s'approche du seuil de significativité ($p=0.071$) et la différence entre Qu2 et Qu3 est significative ($p=0.003$).

Concernant les données qualitatives, le travail réalisé pendant le semestre avec l'ACV était perçu comme interdisciplinaire car les groupes étaient composés de personnes avec des background différents (environnemental, technique, littéraire). Cette perception est partagée par les deux types de groupes.

Les outils numériques n'ont pas été mentionnés pour cette compétence.

La collaboration avec le commanditaire n'a pas été perçue comme un travail interdisciplinaire car aucun étudiant ne mentionne cela. L'ACV, en tant que démarche, a été perçue comme un frein à l'interdisciplinarité par un étudiant d'un groupe témoin : "Le projet [dans lequel nous avons réalisé une ACV] est basé sur une méthodologie et des compétences claires qui laissent moins d'expression à nos parcours antérieurs desquels nous tirons en partie notre multi-disciplinarité." (Étudiant groupe témoin). Une absence d'outils et méthodes pour gérer le travail interdisciplinaire a été relevé par plusieurs étudiants (groupes ACVnum) : "Je ne connais pas d'outil technique ou méthodologique pour gérer des groupes de ce type", "je n'ai pas l'impression d'avoir eu des méthodes ou astuces pour nous préparer à travailler en groupe", "néanmoins je n'ai pas découvert d'outils supplémentaires cette année". (Étudiants groupes ACVnum).

Enfin, les étudiants des deux groupes ont exprimé une vision de l'interdisciplinarité comme une compétence qui s'acquiert par la pratique (au sein des projets intra ou extra scolaires) : "depuis le début de mes études supérieures, j'ai été amenée à travailler avec des personnes issues de domaines très variés", "avec tous les projets du semestre j'ai pu acquérir la compétence", "ça a été plus une compétence qu'on apprend sur le tas et avec l'expérience" (groupes ACVnum et témoin).

Conclusion sur la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire" : Le contexte pédagogique a été perçu comme interdisciplinaire. Beaucoup d'étudiants ont affirmé avoir progressé sur la compétence, sans pour autant directement lier cela à la démarche ACV ou à l'usage des logiciels supports à la démarche ACV. Le prototype ACVnum ne semble donc pas avoir d'influence sur l'acquisition de cette compétence.

Esprit critique

Pour la compétence "Esprit critique", la progression a été davantage accentuée pour les deux types de groupes sur la deuxième partie du semestre (S2) plutôt que sur la 1ère partie du semestre (S1). Pour les groupes ACVnum, la différence entre Qu1 et Qu2 n'est pas significative ($p=0.240$) alors qu'elle l'est pour la différence entre Qu2 et Qu3 ($p=0.011$). Les groupes témoins ont une différence entre Qu1 et Qu2 qui s'approche du seuil de significativité ($p=0.071$) et la différence entre Qu2 et Qu3 est significative ($p=0.003$). Sur la totalité du semestre, une différence significative est visible pour les deux groupes. ($p<0.05$).

Les groupes témoins ont une différence significative entre Qu1 et Qu3 (SG) avec un $p<0.001$. De plus, la différence entre Qu1 et Qu2 s'approche du seuil de significativité ($p=0.071$) et la différence entre Qu2 et Qu3 est significative ($p=0.003$).

Concernant les données qualitatives, la montée en compétence sur l'esprit critique a été reliée à une activité pédagogique précise : la réalisation d'une revue critique (4 mentions dans les groupes ACVnum et 6 mentions dans les groupes Témoins). "La lecture des autres rapports pour la revue critique m'a aussi permis de questionner notre travail, sans oublier les différences de contexte, ce qui permet de prendre du recul et de comprendre les différentes approches" (groupe ACVnum).

Un autre élément, en lien avec la démarche ACV, est l'obligation de se renseigner précisément sur le système technique étudié : recueillir des informations, les vérifier, trouver des sources. Cela s'est traduit par les citations suivantes dans les données : "aussi quand j'effectue des recherches j'aime aller chercher en profondeur les informations et ne pas seulement survoler, reste également la contrainte du temps imparti qui limite parfois les analyses" (groupe ACVnum) et "l'analyse du cycle de vie du réfrigérateur nous a obligé à faire des recherches sur différents sujets et à lire un certain nombre d'articles, et pour garantir que notre rapport soit juste et impartial, nous avons dû réfléchir de manière indépendante." (groupe ACVnum). Ces commentaires étaient identiques pour les deux types de groupes (ACVnum et témoins). Le dernier élément de l'ACV mis en lien avec l'esprit critique concerne la réalisation d'analyses pour tester la robustesse de l'ACV : "l'analyse de gravité, l'analyse d'incertitude des bases de données utilisées, l'évaluation de la qualité des données, l'analyse de sensibilité et l'analyse de la variabilité" (groupe témoin). La compétence "esprit critique" a été mise en lien avec celle sur l'interdisciplinarité : "Je pense avoir développé un peu cette compétence via les discussions autour du projet. Le fait d'être un groupe interdisciplinaire a aussi appuyé cette compétence." (groupe ACVnum), "Grâce surtout aux travaux des groupes je me suis retrouvée quotidiennement à développer mon esprit critique et à me confronter aux opinions des autres" (groupe témoin). Les groupes n'ont pas fait mention de l'apport des outils numériques pour cette compétence.

Conclusion sur la compétence "Esprit critique" : Le contexte pédagogique a été perçu comme ayant participé au développement de l'esprit critique, avec notamment l'activité pédagogique des revues critiques mentionnées. D'autres activités en liens avec la démarche ACV ont été mentionnées : les analyses permettant de prendre du recul face aux résultats, la recherche d'informations sur le système technique étudié. L'usage de logiciels supports à la démarche ACV n'a pas été mentionné. Le prototype ACVnum ne semble donc pas avoir d'influence sur l'acquisition de cette compétence.

Compétence normative

Pour la "Compétence normative", les groupes ACVnum et témoins ont exprimé une progression plus forte sur la première partie du semestre (différence significative) que sur la 2e partie du semestre (pas de différence significative). Également, les deux groupes ont des valeurs significatives pour SG.

Concernant les données qualitatives, les groupes ACVnum ont évoqué le développement de cette compétence grâce aux échanges entre les membres du groupe projet et aux échanges entre le groupe projet et le commanditaire (plutôt sur le fait qu'il y avait des difficultés dans les échanges) : "On n'a pas pu vraiment échanger avec nos interlocuteurs de projet comme voulu donc on n'a pas pu vraiment développer cette compétence" (groupe ACVnum). Les réponses des groupes Témoins se focalisent sur les échanges entre

les membres du groupe projet étudiant (sauf 1 groupe dont l'exemple est donné dans la suite du paragraphe). Trois étudiants des groupes témoins n'ont pas fait le lien entre la compétence et la démarche ACV (zéro pour les groupes ACVnum) : "Je ne suis pas sûr que j'ai eu besoin de cette compétence [dans le cours d'ACV]." (groupe témoin), "À première vue, je ne pourrai pas dire dans quel cadre cette compétence a été développée ou comment je pourrais la mettre en place." (groupe témoin), "Il n'y a pas particulièrement eu de conflit de valeur au cours du projet, je ne considère donc pas avoir "évoluer" sur cet aspect" (groupe témoin), "Pas vraiment eu besoin de cette compétence [dans le cours d'ACV]. Je suis toujours à l'écoute de remarques ou critiques si elles sont justifiées" (groupe témoin).

Certains éléments de la méthode ACV ont servi aux étudiants pour négocier des valeurs dans des situations de conflit. Le prototype ACVnum figure parmi les exemples donnés pour cette compétence. En effet, un étudiant issu des groupes ACVnum écrit : "L'outil [ACVnum] a été un bon outil de dialogue avec notre commanditaire. Cet outil nous a permis de transmettre de manière claire et efficace la démarche ACV." Dans un groupe témoin, c'est plutôt la norme ISO qui a joué ce rôle de médiateur entre les étudiants du groupe et leur commanditaire : "De mon côté, j'ai plutôt eu l'impression de développer ces compétences [...] en discutant avec l'entreprise [...] qui avait une perspective à la limite du Bilan Carbone par rapport à l'ACV et qui nous proposait des frontières du système à analyser qui ne convenait pas à l'Unité fonctionnelle qu'il avait proposé. [...] Quand nous avons évoqué avec lui de recueillir des données de producteurs, il n'a pas trop aimé et a préféré faire uniquement des hypothèses sur ce sujet... Voyant qu'il était cohérent de mettre la production des matières premières dans la modélisation. [...] Pour ma part, j'ai trouvé que le meilleur moyen pour ne pas rentrer dans le conflit ou de se mettre en opposition avec la personne était de citer les normes et de rester très procédurale [...] en montrant à la personne les impacts de ses choix et de ses incohérences."

Il est à noter qu'un étudiant n'a pas compris la compétence (contre sens visible dans sa réponse, groupe ACVnum).

Un autre étudiant a lié la compétence normative à la compétence "travail dans un groupe interdisciplinaire" : "Ça va avec l'apprentissage du travail en groupe interdisciplinaire" (groupe ACVnum).

Conclusion sur la "Compétence Normative" : Le contexte pédagogique a été perçu différemment selon les groupes sur le développement de cette compétence. Pour les groupes Témoins, il est possible de retrouver 3 fois la mention que cette compétence n'a pas été développée dans le cadre de la démarche d'ACV. À l'inverse, dans les groupes ACVnum, il est possible de trouver des références à l'organisation avec le groupe projet et le commanditaire. De plus, le développement de cette compétence est mise en lien avec le degré de collaboration avec le commanditaire (plus la collaboration est faible, moins cette compétence est jugée développée). Cette différence nous pousse à poser l'hypothèse selon laquelle le prototype ACVnum a modifié la perception de la relation entre le groupe projet et le commanditaire.

Résoudre des problèmes

Pour la compétence "Résoudre des problèmes", les deux types de groupes ont exprimé une acquisition de la compétence de manière significative sur S1, S2 et SG, donc entre

chaque questionnaire.

Concernant les données qualitatives, cette compétence apparaît à deux niveaux de la démarche ACV : (1) lors de la définition des enjeux, du système technique à étudier et des objectifs de l'ACV avec les parties prenantes, (2) lors de la proposition de solutions à partir des résultats d'ACV.

Pour (1), voici les éléments issus des données qualitatives : "[L'acquisition de la compétence] s'est axée sur la compréhension du système et les limites d'un point de vue environnemental de l'utilisation d'un tel système." (groupe ACVnum), "Je pense que dans le cadre [de la démarche ACV] j'ai pu développer cette compétence en basant notre système en fonction des besoins de notre commanditaire" (groupe ACVnum), "Sur cette compétence-là, nous avons pu notamment la mettre en place dans le cadre du rapport d'ACV, des discussions avec les parties prenantes ou encore durant les cours." (groupe témoin).

Pour (2) nous avons les données suivantes : "Je pense pouvoir développer un peu plus ces capacités dans le travail aval de l'ACV (ce qui va concerner les conclusions et les perspectives données par les résultats)" (groupe ACVnum), "[La démarche ACV] m'a permis de travailler cette compétence en réfléchissant à des solutions d'améliorations" (groupe ACVnum), "j'ai pu à la suite de ce projet résoudre des problèmes mais il est encore difficile de voir la viabilité des solutions proposées en application." (groupe témoin).

L'ACV était également perçue comme une manière de résoudre des problèmes (outils au service de) : "utilisation de l'ACV pour étudier les impacts" (groupe témoin), "la méthode ACV permet d'identifier des "hot-spot" sur lesquels il est pertinent de s'attarder afin de diminuer les impacts environnementaux du produit en général" (groupe témoin), "[compétence développée] dans le travail aval de l'ACV" (groupe ACVnum), "[La démarche ACV] m'a permis de travailler cette compétence en réfléchissant à des solutions d'améliorations." (groupe ACVnum). Ces mentions étaient dans les deux types de groupes (ACVnum et témoins).

Les outils logiciels utilisés n'ont pas été mentionnés.

Conclusion sur la compétence "Résoudre des problèmes" : Il ne semble pas y avoir de différences entre les deux types de groupes. Bien que l'ACV en tant que démarche ait été mise en lien avec l'acquisition de cette compétence, l'usage de logiciels supports à la démarche ACV n'a pas été mentionné. Le prototype ACVnum ne semble donc pas avoir d'influence sur l'acquisition de cette compétence.

Pensée systémique

Pour la compétence "Pensée systémique", les groupes ACVnum ont une progression significative à S1 ($p=0.009$) et sur S2 ($p=0.041$). Les groupes témoins ont eu une progression significative sur S1 ($p=0.024$) et non-significative sur S2 ($p=0.172$). La p-valeur sur SG est significative pour les deux types de groupes ($p<0.05$).

Concernant les données qualitatives, il n'y a pas eu de mention spécifique autour du commanditaire. L'outil logiciel openLCA a été mentionné par un groupe témoin : "La mise en place de l'ACV sur OpenLCA nous a permis de bien étudier la systémique de notre produit. En effet, nous avons dû identifier puis récupérer de nombreuses informations et données afin de pouvoir modéliser l'ACV de notre produit" (groupe témoin). Un autre élément intéressant est que certains étudiants n'ont pas identifié de lien entre la

pensée systémique et l'analyse de cycle de vie : "Je ne pense pas que [le projet ACV] ait particulièrement contribué à m'améliorer dans cette compétence." (groupe témoin), "Je n'ai pas d'exemple dans le cadre de [de la démarche ACV]" (groupe témoin).

À l'inverse, d'autres étudiants ont affirmé : "Pour réaliser une ACV, il faut penser de manière systémique car l'étude porte sur un système complexe d'entités réalisant un but commun (composé de sous-systèmes) en interaction avec son environnement." (groupe témoin), "j'ai pu développer cette pensée systémique, notamment au cours de la construction du rapport d'ACV afin de comprendre les interactions entre les différents éléments". (groupe témoin), "Je pense que cette compétence rentre vraiment dans le travail préparatoire où l'on va identifier tous les flux et process qui rentrent dans notre système. Pour moi, la discussion et le brainstorming sont très importants pour ça." (groupe ACVnum), "Dans le cadre du projet, l'ACV est un outil multicritères que je trouve pertinent pour montrer le caractère systémique d'un projet. Les interactions entre système et biosphère, les interactions entre les futurs utilisateurs." (groupe ACVnum), "la réalisation d'une analyse de cycle de vie ainsi que la réalisation d'une revue critique nécessitent une pensée systémique." (groupe ACVnum), "Travaux concernant l'ACV" (groupe ACVnum), "J'avais des bases en systémique [...] ça m'a plutôt bien servi pour [la démarche ACV]! On a dû penser le système dans son ensemble afin de n'omettre aucune étape dans notre étude de cycle de vie (et faire des choix de coupure aussi)" (groupe ACVnum).

Conclusion sur la compétence "Pensée systémique" : Il semble y avoir une différence mineure entre les deux types de groupes. Cette différence n'est par contre pas forcément imputable à l'usage du prototype ACVnum (aucune donnée ne permet de l'affirmer ou de l'infirmer). Bien que l'ACV en tant que démarche ait été mise en lien avec l'acquisition de cette compétence, l'usage de logiciels supports à la démarche ACV n'a pas été mentionné. Le prototype ACVnum ne semble donc pas avoir d'influence sur l'acquisition de cette compétence.

Connaissance de soi

Pour la compétence "Connaissance de soi", la progression sur S1 est tendancielle pour les deux types de groupes ($p=0.052$ pour ACVnum et 0.050 pour témoin). Pour la progression sur S2, $p=0.123$ pour les groupes ACVnum et $p=0.608$ pour les groupes témoins, donc une absence de significativité pour les deux groupes. La différence entre Qu1 et Qu3 est significative pour les groupes ACVnum avec $p=0.003$ et pour les groupes témoins ($p=0.015$).

Dans les données qualitatives, plusieurs fois le lien entre la compétence "Connaissance de soi" et la démarche ACV a été évoquée : "j'ai eu l'occasion de le faire dans ce projet. Je me sentais complètement perdue à un moment et j'ai dû un peu me battre contre moi-même pour l'accepter, assumer et le partager avec mon groupe" (groupe ACVnum), "la connaissance de soi est ici mise à l'épreuve dans le cadre d'un projet de réfrigérateur où, afin de répartir les tâches, chaque membre doit organiser le rôle qu'il jouera à la place qu'il occupera dans le projet" (groupe ACVnum), "nous avons travaillé en groupe, donc nous avons développé cette compétence (groupe ACVnum), "les travaux de groupe m'ont permis de m'améliorer beaucoup par rapport à cette compétence" (groupe témoin), "je ne sais pas trop quels outils de chacun sont liés à cette compétence. Mais le projet en lui-même nous a permis de connaître un peu plus les limites de chacun." (groupe témoin).

Les outils logiciels ou les autres compétences n'ont pas été mentionnés.

Conclusion pour la compétence “Connaissance de soi” : Il semble qu’il n’y ait pas de différence entre les deux groupes et les outils logiciels n’ont pas été mentionnés. Les étudiants ont parlé du projet d’ACV de manière générale sans réellement préciser quelle partie de la démarche les a poussé à avoir une réflexion sur leur rôle dans la société.

Contextualisation et vision du futur

Pour la compétence "Contextualisation et vision du futur", la progression sur S1 n'est pas significative pour les deux groupes, avec $p=0.054$ pour les groupes ACVnum et $p=0.210$ pour les groupes témoins. Elle est cependant tendancielle pour les groupes ACVnum. Sur S2, les deux types de groupes ont progressé de manière significative ($p=0.029$ pour les groupes ACVnum et $p=0.006$ pour les groupes témoins). Sur l'ensemble du semestre (SG), les deux groupes ont des p-valeurs significatives.

Les données qualitatives ont permis de voir que cette compétence a été mise en lien avec les interactions entre les groupes projets et leurs parties prenantes. En effet : “les échanges avec l’entreprise nous ont permis de défricher le contexte, de mettre en lumière les éléments d’intérêt que nous avons démobilisé dans le projet (par exemple les scénarios d’usage co-construits avec les commanditaires).” (groupe ACVnum), “Chacun des projets du semestre ont permis de développer un maximum cette compétence. Surtout la contextualisation avec les entreprises et comment comprendre leur vision et notre vision et réussir à imbriquer les deux entre elles afin de faire un projet qui réponde aux mieux aux attentes de chacun” (groupe témoin). Ces témoignages sont présents dans les deux types de groupes. D’autres témoignages ont mis en lien des activités pédagogiques avec la compétence "Contextualisation et vision du futur", notamment : la compréhension du système technique dans son ensemble, la récolte de données, le travail de documentation, la projection des solutions techniques (dans une perspective long-terme), la réalisation d’hypothèses, etc. Les données brutes sont les suivantes : “Je comprends ce que ça représente [comme compétence] mais je pense que je ne serai pas à l’aise à en parler dans le cadre de l’ACV (sauf connaissances techniques et sur les matériaux).” (groupe ACVnum), “L’ACV nous a permis d’envisager les utilisateurs futurs du four solaire. Notamment le transport qui s’est avéré être un impact important (90% du poids de certains indicateurs)” (groupe ACVnum), “à travers le travail de recherche et de contextualisation du rapport” (groupe ACVnum), “oui, dans le projet on a pu bien contextualiser le projet grâce aux différents outils vu en cours” (groupe ACVnum), “afin de réaliser cette ACV nous avons dû faire une recherche approfondie et visualiser sur le long terme l’utilisation de notre système” (groupe ACVnum), “Lors de notre ACV, nous devons analyser une serre verticale dont nous avons pas beaucoup d’informations. Ainsi, il fallait faire des hypothèses pour palier le manque de données. Il fallait donc que nous appréhendions les impacts de ces changements sur le système et penser aux différences entre le système réel et le système analyse lors de l’ACV” (groupe témoin), “Je pense avoir dû travailler cette capacité au cours de la réalisation du rapport d’ACV” (groupe témoin), “Dans le cadre l’ACV, il a d’abord été nécessaire de rassembler l’ensemble des informations relatives à notre objet d’étude. Plus l’on a de connaissances sur l’objet d’étude, et plus les solutions proposées et conséquences seront précises et qualitatives” (groupe témoin), “L’ACV effectuée nous a permis de voir les points chauds de notre système initial et vérifier si nos idées de solutions amenaient un transfert d’impacts ou non. C’est un outil précieux pour cette compétence” (groupe témoin). Ainsi, il semble que la démarche ACV contribue à plusieurs moments

au développement de cette compétence.

Les outils numériques ne sont pas présents dans les réponses.

Conclusion pour la compétence “Contextualisation et vision du futur” : Il semble qu’il n’y ait pas de différence entre les deux groupes pour cette compétence. Les outils logiciels n’ont pas été mentionnés.

Compétence stratégique

Pour la "Compétence stratégique", les groupes ont progressé de manière significative sur S1 ($p=0.003$ pour les groupes ACVnum et $p=0.013$ pour les groupes témoins). Sur S2, les groupes ACVnum n’ont pas de différence significative ($p=0.717$) alors que les groupes témoins ont une différence significative entre Qu2 et Qu3 ($p=0.013$). Sur l’ensemble du semestre, les deux types de groupes ont progressé de manière significative.

Dans les données qualitatives liées à la compétence stratégique, les outils logiciels n’apparaissent pas non plus. La compréhension du lien entre la démarche ACV et la compétence stratégique est variée avec des étudiants qui ne voient pas le lien (“Je comprends cette compétence, mais actuellement je n’ai pas eu l’occasion de la mettre en place de façon pratique” (groupe témoin), “Je n’ai pas d’exemple en lien avec [la démarche ACV]” (groupe témoin)) et d’autres qui l’ont identifié (“Je considère qu’à travers mon projet [d’ACV] notamment, j’ai pu développer cette compétence en comprenant mieux les rouages des industries de manière locale et nationale. Le projet a été très intéressant pour développer cette compétence.” (groupe témoin), “nous sommes restés très en surface pour le projet [d’ACV]” (groupe témoin), “en calculant l’impact environnemental des projets dans une analyse du cycle de vie, nous pouvons proposer des stratégies d’amélioration des flux pour optimiser le cycle de vie des produits et réduire leur impact environnemental” (groupe ACVnum), “J’ai pas eu l’impression de proposer une solution très innovante car c’est super dur de faire un projet sans toutes les informations et un background en menuiserie” (groupe ACVnum)). Cette compétence est mise en lien avec la compréhension du contexte du commanditaire : “prise en compte du besoin du commanditaire, développement de l’idée en fonction des besoins spécifiques et utilisation des résultats de l’ACV pour l’analyser” (groupe témoin), “La compétence stratégique est liée pour moi à la compréhension d’un système / contexte et la formulation d’un plan d’action ou de recommandation [...]. Dans le cas du projet [d’ACV], il s’agit de la mise en place de la méthodologie ACV le long du projet et la formulation de recommandations [au commanditaire].” (groupe ACVnum)

Conclusion pour la compétence “Compétence stratégique” : Il semble qu’il n’y ait pas de différence entre les deux groupes pour cette compétence. Les outils logiciels n’ont pas été mentionnés.

A partir des questionnaires sur les compétences, nous avons tiré des données quantitatives. Ces données ont montré qu’il n’y a pas de différence significative entre les groupes ACVnum et les groupes Témoins. De la même manière, les données qualitatives récoltées dans ces questionnaires n’ont pas permis de montrer de différences fortes entre les groupes ACVnum et Témoins. Plusieurs éléments viennent expliquer l’absence de différence et sont évoqués ci-dessous.

La première raison semble être le fait que les étudiants issus des deux types de groupes appartiennent à la même classe et ont suivi les mêmes cours au sein d'un master commun sur toute la durée de l'expérimentation. Les réponses textuelles aux questionnaires montrent que les étudiants ont établi des liens entre les cours du master et ce qui leur a été difficile d'isoler le cours sur la démarche ACV des autres cours. Dans les réponses aux questionnaires, il est possible de trouver de nombreux verbatims autour des autres cours : sur l'éco-conception, sur l'apprentissage de la démarche RSE, sur l'étude des symbioses industrielles. De plus, d'autres activités pédagogiques réalisées pendant leur cursus académique ou hors de leur parcours académique ont été mentionnés. Ainsi, il semble que lorsque les étudiants ont répondu aux questionnaires, ils ont répondu par rapport à un panel large d'activités et pas uniquement à la démarche d'ACV. Cela limite notre capacité à tirer des conclusions de ces données. La compétence sur laquelle une différence est visible entre les deux groupes et imputable au prototype ACVnum semble être sur la compétence normative.

Il semble que les définitions des compétences ont été bien comprises dans l'ensemble (avec des contre sens d'un ou deux étudiants maximum pour chaque compétence).

Le cours d'ACV était centré sur la compréhension de la méthodologie d'ACV. Le prototype ACVnum était censé accentuer l'aspect collaboratif de la méthode ACV en étant un support à cette collaboration. Il est possible de conclure que le changement d'outil a peu modifié les résultats des analyses de cycle de vie réalisées.

Conclusion pour l'hypothèse 1 (H1) : Les résultats statistiques montrent des différences mineures au niveau des groupes ACVnum et Témoins. Étant donné le périmètre de réponse des étudiants (dépassant largement le périmètre de l'analyse de cycle de vie qu'ils ont réalisés), les résultats obtenus sont difficiles à interpréter. Les données qualitatives ont montré que les outils logiciels utilisés ont très peu été mentionnés par les étudiants dans leurs réponses. Il est possible d'observer une difficulté des étudiants de séparer le cours sur la démarche ACV des autres cours (cours sur la démarche d'écoconception notamment).

Les résultats obtenus questionnent la pertinence d'une récolte de données par questionnaires. C'est la raison pour laquelle un autre type de récolte de données a été réalisé en parallèle : des entretiens collectifs (par groupe projet) autour du suivi des avancées des groupes projets.

Les résultats des questionnaires vont être complétés par les données issues d'entretiens collectifs réalisés en parallèle des questionnaires. Les résultats issus de l'analyse de ces entretiens collectifs sont présentés dans la prochaine section.

6.2.3 Résultats issus des entretiens de groupes

Cette section permet de comprendre comment les outils numériques ont été utilisés par les différents groupes et dans quelle mesure la collaboration est favorisée par ces outils. Nos analyses se sont focalisées sur le prototype ACVnum et le logiciel openLCA.

Les résultats des entretiens collectifs vont être divisés en deux sections : les résultats issus des groupes ACVnum et ceux issus des groupes témoins. La conclusion porte sur les différences analysées entre les deux types de groupes.

Groupes ACVnum

Cette section détaille les résultats issus des entretiens collectifs. Cela va permettre de comprendre l'usage qui a été fait des outils logiciels au cours de la démarche ACV. Les sections sont les suivantes : (1) usage du prototype par les groupes ACVnum, (2) Étude de la cohérence entre le contexte d'usage (niveau de soutenabilité) et l'usage de l'outil numérique, (3) Vérification du niveau de complexité dans les connaissances offertes par le système d'information, (4) Inclusion des parties prenantes dans un processus de collaboration (5) Développement d'un système adapté au contexte, (6) Développement de la compétence interactionnelle, (7) Différents besoins exprimés par les étudiants.

(1) Usage du prototype par les groupes ACVnum - vision globale

Cette section a pour objectif de décrire la manière dont les groupes ACVnum ont fait usage du prototype ACVnum. Cela va permettre de comprendre quelles sont les parties qui ont été réalisées de manière collaborative et quelles parties ont suscité des difficultés.

L'usage du prototype a été différent selon les groupes. La figure 6.6 reprend les différentes parties utilisées par les groupes. Les groupes ont utilisé les parties du logiciel de manière incomplète et parfois sans collaboration avec leur commanditaire. Par exemple, le groupe ACVnum-1 a pré-rempli la partie sur les enjeux, a réalisé de manière collaborative avec un commanditaire la partie sur les indicateurs et n'a pas utilisé de manière collaborative ni approfondie la partie sur le processus qualité. De plus, la partie "représentation visuelle du système technique" a été utilisée uniquement comme un espace d'échanges pour mieux comprendre la manière de connecter des processus industriels entre eux sur le logiciel openLCA utilisé en parallèle.

Quelques verbatims qui me permettent de savoir quelles parties du logiciel ont été utilisées :

- Partie sur les enjeux : "Membre groupe : On a fini de voir avec [le commanditaire] le périmètre de l'ACV. Enfin, on l'a eu relativement tard car il était peu disponible. Donc en fait il confirmait plutôt ce que l'on avait défini plus que du travail en commun sur ACVnum" (groupe ACVnum-1) ;
- Partie sur les indicateurs : "Membre groupe : On a déterminé quand même avec lui les indicateurs." (groupe ACVnum-1). Le pronom "lui" désignait le commanditaire ;
- Partie sur le processus qualité : "Membre groupe : j'avoue que la partie gauche⁶ [du prototype ACVnum] on l'a un peu rempli parce qu'il fallait la remplir mais elle ne nous a pas vraiment aidé... Elle était plus formelle" (groupe ACVnum-1).

Les remarques des étudiants issus des groupes ayant utilisé la partie sur la définition des enjeux de leur ACV :

- Remarque du groupe ACVnum-2 : "Enseignant : et cette première phase⁷, dans quelle mesure ça a été utile pour vous ? Membre groupe : euh bah ça nous a permis d'écrire les points clés de l'ACV, de mettre au propre ce que l'on avait en tête. Membre groupe : ouais pour cadrer un peu les idées" ;

6. L'étudiant désigne la section du prototype ACVnum où les données de la nomenclature du produit doivent être insérées dans un tableau et où la qualité des données est travaillée. Voir la figure 6.6 pour avoir la structure du prototype ACVnum.

7. L'enseignant désigne l'étape dans le prototype ACVnum où les parties prenantes doivent définir ensemble les enjeux liés à la démarche ACV qu'ils souhaitent réaliser

- Remarque du groupe ACVnum-3 : "Membre groupe : c'est bien étape par étape. On lui a montré globalement ACVnum et puis après... comme il y avait des étapes on a fait étape par étape et ça guide vraiment la parole, ce que l'on avait à dire et tout donc c'est pas mal je trouve." (...) "Membre groupe : ça faisait une trame que l'on a suivi pour... enfin pour discuter avec lui en commençant par la base, qu'est-ce que c'est l'ACV. Et de ça... Enfin c'était vraiment un super support de discussions qui nous guide bien".

Les sections "Résultats et interprétation", "suivi de la participation des parties prenantes" et "suivi de la qualité des données" n'ont pas été utilisées.

Les groupes ACVnum 2 et 3 ont réalisé la partie "Enjeux" de manière collaborative avec leur commanditaire. Cependant, le commanditaire a peu mobilisé l'outil et a plus eu une attitude de spectateur par rapport à cette activité.

La partie "Collecte de données" a été complétée par les membres de groupe projet uniquement.

La partie "Processus qualité des données" a été réalisée par les membres de groupe projet uniquement.

Pour le groupe ACVnum-3, la partie "Choix des indicateurs d'impacts" a été réalisée par les groupes du projet uniquement.

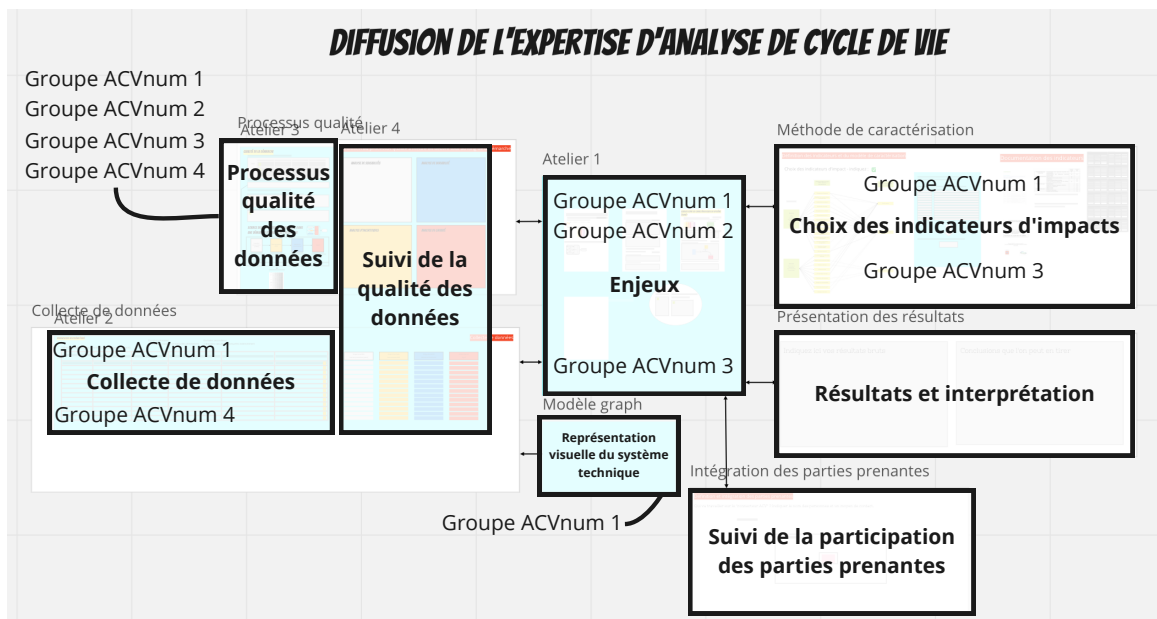


FIGURE 6.6 – Usage du prototype selon les groupes projets ACVnum

La figure représente l'interface du prototype ACVnum avec l'indication des groupes ACVnum et leurs numéros pour chaque section utilisée par ces groupes.

Conclusion (1) Usage du prototype par les groupes ACVnum - vision globale : Le prototype ACVnum a été utilisé de manière disparate et n'a pas été utilisé dans son intégralité par tous les groupes ACVnum. Cela révèle une possible inadéquation entre la pratique des étudiants et les fonctionnalités du prototype.

(2) Adéquation du contexte d'usage

Cette section a pour objectif de décrire si le prototype ACVnum était adapté au contexte dans lequel il était utilisé, en l'occurrence une situation où les "experts ACV" étaient des étudiants en cours d'apprentissage. Les commanditaires étaient chacun ancrés dans des contextes différentes (entreprise, communauté en transition, association) avec des compréhensions différentes de la soutenabilité (de la vision business-as-usual à la soutenabilité forte). Cette répartition a été souhaitée afin de voir si le prototype s'adaptait mieux à certains contextes.

Les groupes ont tous eu des difficultés à trouver des moments de collaboration avec leur commanditaire. Tous les groupes ACVnum ont justifié le fait de ne pas avoir collaboré par la faute du commanditaire. Soit le commanditaire était jugé trop mature sur les questions environnementales, soit le commanditaire était jugé pas assez intéressé pour participer à la collaboration. Par exemple, un groupe a témoigné à la fin du processus d'ACV lors d'un échange : "Enseignant : Est-ce que vous pensez que via ce processus d'ACV, vous avez fait changer la personne sur sa vision de l'ACV ? Membre groupe : Non car on a eu qu'une réunion avec lui pour parler de l'ACV. En plus c'était [un commanditaire engagé] donc il est bien rôdé déjà en termes d'actions environnementales et tout ça... et ouais non on a pas eu l'occasion..." [...] "Membre groupe : si on avait eu plus de contacts, peut-être que oui, peut-être que l'on aurait plus parlé de l'ACV, mais là finalement pour l'ACV on a pas eu tant de contact que ça. On a fait de la récolte d'information, mais on a eu très peu... enfin n'on a pas eu de contact."

Un autre groupe a expliqué pourquoi ils avaient peu utilisé le logiciel : "Membre groupe : on a utilisé que la première étape [avec le commanditaire]. On l'a utilisé assez rapidement et ensuite après le reste [du prototype] on ne l'a pas vraiment utilisé. Bah j'ai l'impression que ça a vraiment un intérêt quand on est en contact avec [le commanditaire] et nous on ne peut pas vraiment dire que l'on avait un contact avec [le commanditaire]." (groupe ACVnum-2).

Un troisième groupe : "Membre groupe : oui, je pense qu'ils n'ont pas vraiment d'attente par rapport à l'ACV. C'est peut-être dans le cadre du cours mais [le commanditaire] en tant que tel a déjà fait appel à des étudiants et les retours que [le commanditaire] a eu des étudiants ne l'intéressaient pas, et vraiment ce qu'elle veut c'est un prototype. Donc je ne sais pas si ça s'applique pour nous ou pas..." (groupe ACVnum-3)

Conclusion (2) adéquation du contexte d'usage : Les étudiants ne semblent pas avoir eu beaucoup de contacts avec leurs commanditaires, peu importe les contextes. Les étudiants ont porté des intentions à leur commanditaire tout en se rendant compte que plus de collaboration aurait amené des échanges autour de l'ACV qui auraient pu servir au commanditaire et au groupe projet. Il est possible d'identifier ici un problème autour de la gestion de conflit et à la compétence normative, c'est-à-dire à négocier des choses avec le commanditaire (exemple : le périmètre de l'ACV ou l'objectif de l'ACV).

(3) Vérification du niveau de complexité dans les connaissances offertes par le système d'information

Cette section a pour objectif de décrire si les informations présentes dans le prototype ACVnum étaient accessibles pour l'ensemble des participants (niveau de complexité adé-

quat). J'ai choisi de me concentrer sur les deux parties du prototype ACVnum qui ont été réalisées de manière collaborative : la définition des enjeux de l'ACV et le choix des indicateurs d'impacts.

La définition des enjeux autour de l'ACV a été réalisée de manière collaborative par le groupe ACVnum-3. Voici leur témoignage relatif à leur usage, recueilli à la suite de leur session collaborative : "Membre groupe 1 : mais sinon [le prototype ACVnum] il est top... enfin ça aide vraiment." (...) "Enseignant : j'avais quelques questions, comment [votre commanditaire] et vous avez-vous réagi par rapport à l'usage du prototype ACVnum ? Comment est-ce que vous vous êtes senti ? Est-ce que vous étiez perdu ? Peut-être que vous n'avez pas trouvé ça forcément utile ? Est ce que ça vous a guidé ? Comment vous vous en êtes sortis ? Membre groupe 1 : c'est bien étape par étape. On lui a montré globalement ACVnum et puis après... comme il y avait des étapes on a fait étape par étape et ça guide vraiment la parole, ce que l'on avait à dire et tout donc c'est pas mal je trouve. Membre groupe 2 : ça faisait une trame que l'on a suivi pour... enfin pour discuter avec lui en commençant par la base, qu'est-ce que c'est l'ACV. Et de ça... Enfin c'était vraiment un super support de discussions qui nous guide bien." (groupe ACVnum-3).

Un groupe projet a témoigné de l'utilisation du prototype ACVnum sur la partie en lien avec les indicateurs d'ACV (choix commun des indicateurs cohérents avec l'analyse du système technique) : "Membre groupe : et aussi, au tout début, ça a quand même aidé, au début, le [prototype ACVnum] parce que ça donnait quand même une belle liste de toutes les catégories d'impacts. Enfin, on avait vraiment tout sous les yeux, mêmes pour la sélection des critères." (...) "ça facilitait le choix de la méthode de calcul car il y avait les documents dessus qui étaient pas mal. Donc ça a été une bonne aide." (groupe ACVnum-1) La collaboration a pu être possible sur cette partie du logiciel ACVnum. Cependant, un autre groupe témoigne sur la même section (les indicateurs d'impacts) : "Enseignant : et là du coup je ne comprends pas pourquoi vous n'avez pas pu utiliser ACVnum. Membre groupe 2 : parce qu'il n'y a pas de description des méthodes sur ACVnum, si ? Enseignant : Et bien si, tu vois, je vois "méthodes" avec un gros tableau. Membre groupe 2 : On a cherché avec Membre groupe 1, on n'a pas vu. Membre groupe 1 : c'est ça on voulait regarder en fait, on était sur le truc "méthode" mais on n'a peut-être pas tout bien regardé ou alors... Enseignant : ouais parce qu'en fait c'est pas une photo là dans "méthode", c'est un document. Et donc en fait vous pouvez passer les pages. Et donc en fait là vous avez l'ensemble des méthodes (...) Membre groupe 1 : c'est exactement ce qu'on cherchait. On l'a cherché sur ACVnum, c'est juste qu'on n'avait peut-être pas compris que c'était là." Ainsi, certaines fonctionnalités du prototype n'ont pas été comprises par les membres du projet, ce qui suppose une faible appropriation de l'outil.

<p>Conclusion (3) niveau de complexité des connaissances : le niveau de complexité des connaissances semble adéquat mais les fonctionnalités de l'outil ne semblent pas correspondre.</p>
--

(4) Inclusion des parties prenantes dans un processus de collaboration

Cette section a pour objectif de montrer dans quelle mesure la collaboration a pu être installée avec l'ensemble des parties prenantes.

Le groupe ACVnum-1 a eu des difficultés à identifier quelle méthode de calcul utiliser et ne s'est pas aperçu qu'un système de documentation avait été mis en place au sein d'ACVnum.

L'inclusion des parties prenantes indirectes a semblé difficile pour les groupes et cela n'a été fait par aucun groupe. Pourtant, un groupe a fait appel à un expert extérieur au commanditaire et extérieur au groupe projet afin d'avoir un avis sur le système technique étudié. Ainsi, ce groupe a été en contact avec une partie prenante indirecte. Cependant, le contact a eu lieu avant l'introduction du prototype ACVnum dans le semestre et les étudiants n'ont pas souhaité le recontacter pour l'inclure dans la démarche ACV (groupe ACVnum-2).

Concernant le groupe ACVnum-3, le témoignage suivant a été recueilli : “Enseignant : est ce que vous pensez que cette première étape ça l'a un petit peu... Engagé dans la démarche d'ACV ? Ou bien vous le sentez complètement extérieur ? Membre groupe : je dirais un peu plus dedans... mais...” (...) “Membre groupe : quand on lui a demandé qui d'autre pouvait participer à cette démarche sur ACVnum, il y a que lui et [son collègue].”

Conclusion (4) inclusion des parties prenantes dans un processus de collaboration : le prototype ACVnum n'a pas permis l'intégration de parties prenantes indirectes. De plus, l'ajout des parties prenantes indirectes dans la démarche ACV n'a pas semblé pertinent pour les étudiants.

(5) Adaptation du prototype au contexte

Il semble que même si le prototype était modifiable en termes de structure et de contenu, les usagers ne s'étaient pas approprié l'ensemble des fonctionnalités du prototype ACVnum.

Le groupe ACVnum-1 a exprimé les limites de certaines parties du prototype : “Membre groupe : j'avoue que la partie gauche on l'a un peu rempli parce qu'il fallait la remplir mais elle ne nous a pas vraiment aidé... Elle était plus formelle.” La "partie de gauche" désigne la partie structurant les données et définissant les différentes analyses (sensibilité, variabilité, incertitude, gravité).

Le groupe ACVnum-3 a témoigné de la manière dont les membres du groupe projet ont animé l'atelier autour des "enjeux" de l'ACV : “Enseignant : okay, et est-ce que ça, en tout cas sur ces 3 premières étapes, est-ce que ça vous a clarifié des choses et [votre commanditaire] comment il a réagi par rapport à ça ? Membre groupe : [Notre commanditaire] ne connaissait pas l'analyse de cycle de vie. Il en avait déjà entendu parler mais il ne savait pas trop ce que c'était. Après quand on a dit, qu'est-ce que cela vous évoque, souvent on reprend les mots que l'on entend... Je ne sais pas si ça sert vraiment ça... ça paraît évident quand avec les mots "cycle de vie", "quantification"... Donc après on a lu, on a dit à quoi ça nous faisait penser mais ce n'est pas allé plus loin que ça, je ne sais pas si ça doit aller plus loin...”. Par ce témoignage, il est possible de voir que les groupes ne savaient pas vraiment comment utiliser l'espace ACVnum sur les enjeux, ni comment se l'approprier. De plus, au vu des propos, il ne semble pas qu'une stratégie a été discutée au préalable au sein du groupe pour animer l'atelier.

Conclusion (5) Adaptation du prototype au contexte : le prototype a été peu approprié par les membres des groupes ACVnum.

(6) Développement de la compétence interactionnelle

La compétence interactionnelle a été mise à rude épreuve au cours de ce processus. En effet, il a été difficile pour les groupes ACVnum d'entrer en contact avec leur commanditaires. Certains groupes sont passés par une tierce personne au lieu de contacter directement le commanditaire. Les étudiants se sont également posés des critères pour discuter avec leur interlocuteur comme par exemple le fait que l'interlocuteur devait être géographiquement proche du système technique étudié pour être contacté : "On était en contact avec eux au tout début quand on avait fait le point en visio. Là j'étais en contact avec un stagiaire [du commanditaire] mais c'était très espacé" et "Là j'étais en contact avec un stagiaire de [du commanditaire] mais il ne répond pas souvent... Et surtout là dernièrement, c'est pas la personne avec qui on avait discuté au tout début, c'est une autre personne je crois. Un stagiaire m'avait dit que ça serait plus direct de discuter avec cette personne mais il n'était pas sur place" (groupe ACVnum-1).

Également, il est possible d'identifier un décalage entre ce que le groupe avait prévu de faire en termes de collaboration (faible collaboration) et le besoin de collaboration que pose l'outil (forte collaboration) : "il fallait que l'on fasse une ACV sur la solution que nous avons retenue dans le cadre d'une démarche d'éco conception faite ultérieurement. Et si c'est ça, en fait vu que nous on a pas tant de contact avec le commanditaire, on va faire un projet qui en théorie va leur servir, mais en pratique... En fait on n'était pas trop en contact avec le commanditaire pour la démarche d'éco conception et là on va être beaucoup en contact avec la démarche d'ACV pour quelque chose qui va peut-être pas leur rendre service... ou pas forcément.", "On était pas beaucoup en contact avec le commanditaire pour la démarche d'écoconception et là on le devient beaucoup [avec la démarche ACV]... J'avais peur que l'on se retrouve un peu bête avec notre ACV qui ne va pas coller [à leurs attentes]" (groupe ACVnum-1). Ce décalage a mis les groupes sous pression car les échanges sur l'unité fonctionnelle, sur l'objectif de l'ACV, sur le périmètre de l'ACV, étaient des éléments qu'il fallait discuter. Les étudiants ont vécu ces moments d'échanges comme des situations de conflits, sans forcément arriver à entrer dans une stratégie de négociation. C'est la raison pour laquelle la compétence normative a été particulièrement sollicitée pour ces groupes.

Conclusion (6) Développement de la compétence interactionnelle : il semble que les groupes ACVnum ont été dans des situations où ils devaient comprendre un système industriel précis et négocier le périmètre de l'ACV, l'unité fonctionnelle ou même le système technique choisi par le commanditaire. Ces échanges ont été redoutés par les étudiants qui se sont posés "en contre" par rapport à leur commanditaire, avec des difficultés à être dans une posture de négociation. Également, il a été difficile pour certains groupes de monter en compétence sur les éléments techniques (connaissances des processus industriels).

(7) Différents besoins exprimés par les étudiants

Une des limites de l'expérimentation avec openLCA et ACVnum est que ces logiciels interviennent en doublon sur certaines étapes de la démarche ACV : "Enseignant : et le

modèle graph⁸, les données, vous ne l'avez pas utilisé? Membre groupe : bah c'était plus pour que [notre commanditaire] ait un visuel du truc si jamais il voulait voir. C'est vrai que du coup nous comme on l'avait à côté ça ne servait pas à grand-chose de le mettre sur [le prototype]. C'était plus si lui voulait avoir une vue de... si jamais il avait regardé ça aurait pu lui servir de voir ce que l'on avait fait mais pour nous... pas tant."

Groupes témoins

Cette section est dédiée aux groupes témoins, notamment à l'analyse du besoin de collaboration exprimé par les étudiants lors de la réalisation d'une démarche d'ACV.

(1) Contacts avec le commanditaire

Pour les groupes témoins, les contacts avec les commanditaires étaient également perçus comme des moments difficiles, notamment par le peu de temps du commanditaire accordé à la démarche (groupe témoin-2) ou le manque d'accès aux données (données des fournisseurs pour le groupe témoin-4, données issues du commanditaire pour les groupes témoins-2 et 3).

Pour le groupe témoin-2, le périmètre ainsi que les données viennent du commanditaire. Les étudiants ont adapté leur système au mode de vie de la communauté en transition : "[Notre commanditaire] nous a dit que les eaux grises ne seraient que des eaux de consommation, il n'y a pas d'eau noire car ils ont des toilettes sèches."

Pour groupe témoin-3, il y a eu une forte réticence à définir l'unité fonctionnelle avec le commanditaire : Etudiant : "après ça ne l'intéresse pas tant ce que l'on va faire. Par rapport à ses attentes. On peut en parler avec lui. Parce que là on allait plutôt partir sur l'ACV d'un [système technique A]. C'est pas du tout sa problématique, lui quand il va avoir un... si vraiment plus tard il veut investir dans [le système technique A], il va investir sur des [un système technique] qu'il trouve directement sur le marché."

Conclusion (1) contacts avec le commanditaire : Il ne semble pas que les contacts entre les commanditaires et les groupes témoins aient été réguliers (1 dans le semestre uniquement).

(2) Réaction par rapport au logiciel d'ACV

Deux groupes témoins ont commenté l'usage du logiciel d'ACV openLCA dans leur contexte de projet de groupe.

Groupe témoin 2 : "Étudiant : ouais et bien là en tout cas pour le dernier livrable, l'outil qui nous aide c'est Teams parce que c'est assez collaboratif donc on va dire que pour la rédaction c'est beaucoup plus facile de se partager le travail. Euh, comme on l'avait dit précédemment, pour les logiciels d'ACV c'est pas encore [propice à la collaboration] (...). Le travail sur l'ACV, même s'il a été partagé quand on pouvait en présentiel, on va dire qu'il y avait un expert technique du logiciel dans le groupe, sur le dernier livrable on peut clairement dire que c'était [Nom étudiant]. On essaie de se tenir à jour au fur et à mesure, mais c'est sûr qu'après on veut une répartition de travail qui soit égale entre les membres du groupe, sans pour autant être hypocrite et dire que tout le monde a eu le temps de travailler sur le logiciel openLCA parce que ça ne serait pas vrai."

8. Ici, l'enseignant désigne la représentation graphique de la nomenclature produit que les étudiants doivent réaliser avant de rentrer leur nomenclature sur le logiciel openLCA.

Puis une comparaison a été faite avec les logiciels de conception assisté par ordinateur : "Etudiant : tout le monde ne peut pas bosser en simultané sur une même pièce mais tout le monde peut bosser sur des parties différentes de la pièce. Et ça fait une énorme différence. Par exemple dans notre cas, si en ACV il y avait quelqu'un qui pouvait chercher les process, commencer à créer les liens tout ça et qu'à côté il y a une personne qui est déjà sur le logiciel peut rentrer tous les calculs de valeur. Pas les providers. Il y a une partie ce serait la map et une autre partie ou ça serait les calculs. Si on pouvait avoir ce genre de logiciel, ça serait top."

Ce sujet de collaboration sur le logiciel openLCA a également été évoqué avec le groupe témoin-3, qui se demandait comment transmettre le travail réalisé en local à une autre personne du groupe.

Conclusion (2) Réaction par rapport au logiciel d'ACV : Deux groupes sur quatre ont exprimé leur difficulté à travailler de manière collaborative (au sein du groupe projet et non avec l'ensemble des parties prenantes) sur le logiciel openLCA à leur disposition...

Conclusion pour l'hypothèse 2 (H2) : Les entretiens collectifs nous ont permis d'obtenir des données plus complètes sur l'usage des outils numériques que les questionnaires sur les compétences. Concernant les résultats recueillis, un paradoxe a été observé. Les groupes ayant eu à utiliser le prototype ACVnum et à co-construire la démarche ACV entre les membres du groupe projet et leur commanditaire sur cet outil ont en réalité peu utilisé le prototype ACVnum de bout en bout (peu d'appropriation, usage de quelques ateliers en fonction des besoins du groupe projet). Par opposition, deux groupes témoins ont émis un besoin de collaboration autour du logiciel numérique (au niveau du groupe projet uniquement, pas avec leur commanditaire) et ont décrit certaines des fonctionnalités d'ACVnum. Ainsi, les groupes ayant eu des occasions de collaboration sur le prototype ne l'ont pas utilisé en affirmant qu'ils n'en avaient pas eu besoin, tandis que les groupes n'ayant pas eu le prototype ont exprimé le besoin d'avoir un outil similaire. Une des conclusions possibles de cette étude est que le besoin de collaboration pour les processus d'ingénierie pour la soutenabilité existent chez les acteurs de l'ingénierie pour la soutenabilité mais que le prototype ACVnum n'est pas une manière pertinente pour médiatiser ce besoin.

Les conclusions de cette section vont être synthétisées dans la section suivante, sous la forme d'un tableau. Dans le chapitre [?], les résultats obtenus seront reliés aux caractéristiques de la permaingénierie (notamment sur le paradoxe observé et la question de la collaboration).

6.2.4 Synthèse et conclusion de la récolte de données

Cette section présente la synthèse de l'expérimentation 1. Le tableau 6.8 permet de rappeler à quelle question de recherche l'expérimentation permet en partie de répondre, l'objectif scientifique et les résultats.

Table 6.8: Synthèse des résultats issus de l'expérimentation en situation d'apprentissage

Type	Description
Question de recherche	Quels sont les caractéristiques des outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ?
Objectif scientifique	Proposer une médiatisation des principes structurants dans le cadre d'expérimentations
Expérimentation	Tester le prototype ACVnum (médiatisation de notre cadre théorique) sur des futurs praticiens de l'analyse environnementale
Résultats issus des analyses comparatives des données statistiques	<p>Différence significative entre Qu1 et Qu3 pour tous les groupes (ACVnum et Témoins), pour toutes les compétences, sauf :</p> <p>Pour les groupes ACVnum :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Travail dans un groupe interdisciplinaire : pas de significativité entre Qu1 et Qu3 <p>Pour les groupes Témoins :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Pensée systémique : pas de significativité entre Qu1 et Qu3 — Connaissance de soi : pas de significativité entre Qu1 et Qu3
Résultats issus des analyses du développement des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité lors de la démarche ACV	<p>De nombreux étudiants parlent d'autres cours du master ou d'autres activités pédagogiques (dans et hors cursus académique). Cela remet en cause les réponses quantitatives car cela signifie que les étudiants ont en partie répondu aux questionnaires avec l'ensemble des cours de leur master en tête et non seulement la démarche ACV.</p> <p>Une différence est à noter pour la compétence normative, avec un usage du prototype ACVnum en tant qu'outil structurant le discours en face du commanditaire et permettant de le faire adhérer à la démarche ACV.</p>
Résultats issus des analyses de la correspondance entre les attentes des étudiants et les caractéristiques des logiciels utilisés	<p>Mise en évidence d'une situation paradoxale avec des groupes ACVnum qui ont eu des réticences à utiliser le prototype ACVnum et à l'utiliser avec le commanditaire. Il y a également eu une réticence à utiliser le prototype au sein du groupe et peu d'appropriation des différentes sections de l'outil numérique.</p> <p>Par opposition, les groupes témoins ont eu des réflexions autour de la collaboration possible au niveau du groupe projet (hors commanditaire) sur le logiciel d'ACV. Ils ont exprimé un besoin de collaboration entre les membres projets et le logiciel d'ACV comme un frein à leur collaboration, et même un frein à leur apprentissage de la démarche ACV.</p>
Conclusion générale	<p>Le prototype ACVnum a été perçu comme un élément perturbateur par les groupes ACVnum car cela allait mettre en évidence la non-adéquation des unités fonctionnelles définies par rapport aux besoins du commanditaire.</p> <p>Un besoin de collaboration a été exprimé par les groupes témoins (deux groupes sur les quatre), tandis qu'un refus de la collaboration a été exprimée par les groupes ACVnum. Cela nous pousse à penser que la collaboration est effectivement un besoin pour ces futurs praticiens mais que la manière dont la collaboration est médiatisée dans le prototype ACVnum ne correspond pas à leurs attentes.</p>

La prochaine section est dédiée à la seconde expérimentation.

6.3 Expérimentation en contexte de soutenabilité forte

Cette deuxième expérimentation est une étude immersive au sein d'un éco-hameau, où un *focus group* a été observé en situation d'utilisation du prototype ACVnum. Cette section est composée (1) d'une présentation de l'expérimentation, (2) une description des résultats obtenus lors des différentes analyses qualitatives et (3) d'une synthèse des résultats.

6.3.1 Présentation de l'expérimentation

Cette sous-section est composée d'une description de l'expérimentation, des hypothèses testées, de la récolte de données et la méthode de traitement des données choisies.

Description

Par cette expérimentation, je souhaite comprendre comment un artefact numérique peut s'inscrire dans un contexte quotidien où les acteurs agissent avec un faible impact et un bien-être suffisant. Pour cela, nous avons choisi un éco-hameau en France qui fait partie du réseau des Oasis⁹. La définition d'une Oasis est la suivante : "Les oasis sont des lieux de vie et d'activité écologiques et collectifs. On y expérimente des modes de vie sobres et solidaires au service de la préservation du vivant." [du Coq à l'Âme, 2022]. Dans ce cadre, l'éco-hameau étudié porte la raison d'être suivante : "Être, faire et vivre ensemble, dans l'élégance de la sobriété heureuse, dans l'harmonie de la diversité du vivant. Expérimenter les chemins solidaires du quotidien qui ré-enchantent le monde! Un éco-hameau solidaire pour être co-responsables de nos besoins et de nos impacts." Ce contexte correspond à un contexte de soutenabilité forte tel que défini dans le chapitre 2 car les habitants de l'éco-hameau ont un projet collectif de vivre bien (au-dessus d'un plancher social) avec un impact environnemental faible (en dessous d'un plafond environnemental). La géographie de l'éco-hameau est schématisée en annexe 9.27.

Au sein de l'éco-hameau, nous avons choisi un *focus group* à partir de personnes souhaitant apprendre à réaliser une analyse de cycle de vie. Ce groupe était composé de 3 à 7 habitants de l'éco-hameau. Un *focus group* est un groupe de discussion qui est réuni autour d'un sujet donné. Le sujet donné au *focus group* était la réalisation d'une analyse environnementale. Le projet commun du groupe était la réalisation d'une analyse de cycle de vie d'une tiny house.

Le *focus group* était hétérogène dans le sens où le profil des personnes était varié tant au niveau des activités (retraité, graphiste, ingénieur, chercheur, sans activité), des genres, des âges (de 25 à 65 ans). Tous les membres du *focus group* étaient habitants de l'éco-hameau. Lors de chaque session du *focus group*, une activité en lien avec la réalisation d'une analyse de cycle de vie était proposée. Chaque session du *focus group* a fait l'objet d'un enregistrement audio. La chronologie et les sujets de chaque session sont décrites dans la figure 6.7.

9. Le lien vers la carte montrant l'ensemble des Oasis dans le monde : <https://cooperative-oasis.org/decouvrir/les-oasis/>

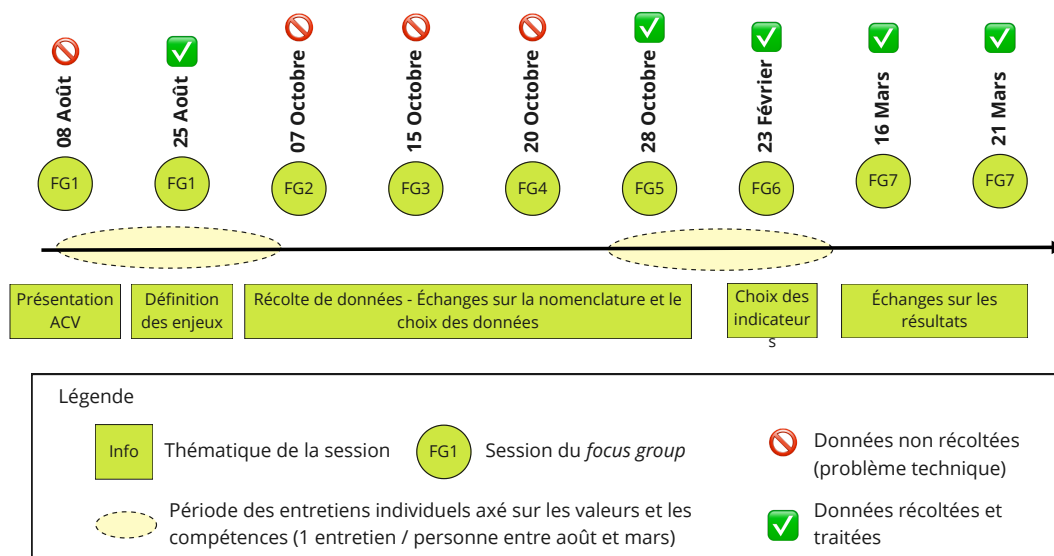


FIGURE 6.7 – Chronologie de la récolte de données de l'expérimentation en contexte de soutenabilité forte

La figure représente la chronologie de la récolte des données auprès du *focus group*. Les ronds "FG X" représentent les séances de travail avec le *focus group*. Chaque carré sous la barre chronologie indique la thématique de la séance.

Récolte de données

Cette expérimentation n'est pas comparative. L'objectif n'est pas de comparer la manière dont différents éco-hameaux s'approprient la démarche ACV mais plutôt comment l'outil numérique supportant la démarche ACV s'intègre dans le quotidien d'un collectif en transition. Cette expérimentation en immersion permet de comprendre comment des outils numériques d'ingénierie sont utilisés dans des contextes de transition écologique. La récolte de données s'est focalisée sur les membres et activités d'un *focus group* (décrit précédemment), à différentes temporalités, afin d'observer l'usage du logiciel par les acteurs.

Les données récoltées sont donc :

- Une grille où chaque personne du *focus group* s'est positionnée par rapport aux compétences d'ingénierie pour la soutenabilité. Les niveaux de la grille sont les mêmes que ceux utilisés pour l'enquête dans un cadre d'apprentissage d'ingénierie (données quantitatives et qualitatives) ;
- Les données issues d'entretiens individuels réalisés avec les membres du *focus group* pour comprendre leur motivation à agir. Ces entretiens individuels étaient centrés sur les valeurs (données qualitatives) ;
- Les données issues des enregistrements des sessions de travail collectif (données qualitatives).

Traitement des résultats

Les entretiens individuels ont été traités grâce à un processus de codage axé sur les valeurs.

Les entretiens collectifs ont été traités selon un processus d'analyse déductif avec deux éléments majeurs :

- Les aspects de la démarche ACV ayant posé des difficultés aux membres de l'Oasis ;
- Les aspects de la démarche n'ayant pas posé de difficultés aux membres de l'Oasis.

6.3.2 Résultats des entretiens individuels (axés sur les valeurs)

L'objectif de cette section est de comprendre l'adéquation entre les valeurs des membres du *focus group* et ceux issus du prototype ACVnum. L'analyse des valeurs des membres du *focus group* est d'autant plus importante que l'ensemble des membres ont, dans leur parcours de vie, refusé ou arrêté des activités personnelles et/ou professionnelles car celles-ci ne correspondaient pas à leurs valeurs. Cela se retrouve dans tous les témoignages sans exception. Les membres du *focus group* ont pris des risques en quittant une situation jugée stable (emploi, famille, formation avant l'obtention du diplôme) pour commencer des projets qui pourraient être jugés plus risqués (perte d'argent, beaucoup d'énergie nécessaire, processus long) mais davantage en cohérence avec leurs valeurs. Ainsi, si les valeurs embarquées dans le prototype ACVnum ne correspondent pas à celles des membres du *focus group*, il y a un risque réel que le prototype ne soit pas utilisé / rejeté. Une non-aversion pour le risque est à observer chez ces habitants.

Trois éléments vont être présentés dans cette section : les valeurs principales qui émergent suite au codage des entretiens, la vision de la technologie portée par les habitants (si une vision commune existe ou non) et la maîtrise des habitants des démarches d'ACV.

Les valeurs majeures identifiées dans les entretiens sont les suivantes :

- **Autonomie (niveau individuel et collectif)** : autonomie par rapport "aux conditionnements" que l'on peut avoir au niveau individuel et collectif. Cohérence entre la recherche d'autonomie et acceptation des responsabilités liées à l'autonomie (Habitant 1). Compris également comme la capacité à réaliser un projet de bout en bout avec ses propres compétences (Habitant 5) ;
- **Indépendance financière** : valeur proche de l'autonomie mais relativement différente dans le sens où l'indépendance est par rapport à d'autres alors que l'autonomie se définit par rapport à soi-même (Habitant 2) ;
- **S'intégrer dans une démarche collective** : participer à une démarche collective (défini comme un "élan" par Habitant 1), porter les enjeux écologiques à un niveau collectif. Proche d'une notion de devoir "prendre soin des humains, prendre soin de l'humanité, au service de ce qui fait la vie" (Habitant 1). Certains habitants ont acquis cette compétence car ils ont testé une démarche individuelle pour se rendre compte que la démarche collective était plus en adéquation avec leur projet (Habitants 3 et 4). Ainsi, valeur relativement récente pour certains habitants qui se sont tournés vers une écologie individuelle dans un premier temps. Après quelques mois d'"héroïsme individuel", la personne s'est tournée vers une approche plus collective de la transition écologique (Habitant 4) ;

- **Besoin de cohérence (niveau individuel et collectif)** : description d'un état de sidération quant à la situation environnementale (Habitant 1). L'habitant a exprimé un besoin de cohérence entre les connaissances environnementales et les actions mises en oeuvre par la société. Ce besoin de cohérence est retrouvé dans les différents entretiens, par les actions réalisées par les acteurs (quitter ses études par manque de cohérence entre ses valeurs et les apprentissages pour Habitant 2, ne pas accepter un poste pour Habitant 5) ;
- **Faire** : ce n'est peut-être pas une valeur mais l'on retrouve dans le témoignage de l'habitant une volonté de faire (création du système d'information de l'Oasis, création d'une méthodologie pour calculer son empreinte carbone, volonté de tester et de voir les systèmes pour ensuite prendre des décisions) (Habitant 2). Cela est également visible chez Habitant 5. D'autres entretiens doivent être menés afin de recueillir des témoignages plus complets pour analyser cet aspect plus finement ;
- **Sérénité** : se sentir bien en soi, quête individuelle de cohérence intérieure (Habitant 3) ;
- **Empathie** : se mettre à la place des autres (Habitant 3) ;
- **Transparence** : Relié au système politique et aux prises de décisions (Habitants 4 et 5) ;
- **Expérimenter** : Ceci n'est pas une valeur. Nous retrouvons chez cet habitant un besoin d'expérimenter pour se rendre compte des limites et ainsi avancer (par exemple avec la citation : "je me sens mieux dans la posture d'essayer de nouvelles choses", Habitant 4).

Une vision commune de la technologie se dégage des entretiens individuels avec les membres du focus group. Les habitants de l'éco-hameau ne sont pas contre l'usage de la technologie (est-ce d'ailleurs possible?) ou anti-technologie. Les habitants utilisent de nombreux outils techniques, parfois des technologies jugées "high-tech" comme des téléphones portables, des ordinateurs, etc. Une certaine appétence pour la technologie est même visible dans le parcours de certains habitants (deux ayant fait des études en ingénierie, un autre habitant ayant une famille proche des milieux techniques). Par contre l'*hybris* présent dans la production technologique est choquante pour les habitants. Quelques adjectifs et verbatims qualifiant la production technologique actuelle : "incohérence", "absurdité", "mégalo manie", "on pousse trop loin...". Les habitants sont critiques par rapport à la production de technologies dans le cadre de la société de consommation occidentale. Pour les habitants, la technologie doit être perçue comme un moyen et non une fin en soi. La technologie doit répondre à un besoin, et être développée à partir d'une vision politique en cohérence avec les enjeux de transition écologique. La soutenabilité est comprise par les habitants de l'éco-hameau comme un problème complexe, multi-échelle (individuel, multi-échelle, possibles effets rebonds). Ainsi, la technologie n'est pas une réponse aux "problèmes" de soutenabilité mais un moyen parmi d'autres pour adresser les problématiques écologiques.

Par rapport au niveau des habitants sur la maîtrise de la démarche d'ACV, il est possible d'affirmer que leur niveau est hétérogène. La figure 6.8 représente, autour d'un axe, le niveau d'expertise de chaque habitant par rapport à l'ACV.

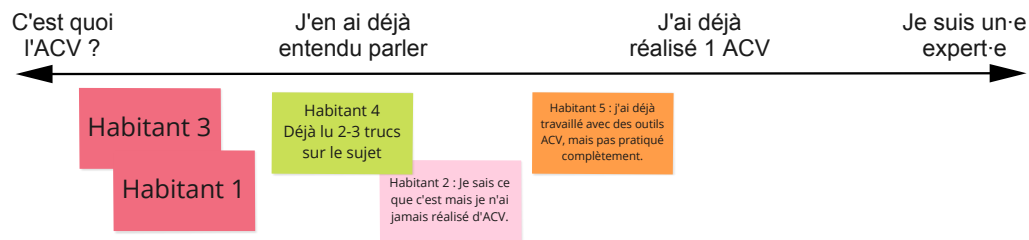


FIGURE 6.8 – Positionnement des habitants par rapport à un axe selon leur expertise dans le domaine de l'analyse de cycle de vie

L'axe informe du niveau d'expertise en analyse de cycle de vie (de l'absence de connaissances en ACV à gauche à une connaissance et maîtrise de la méthode ACV à droite). Chaque post-it représente le positionnement d'un membre du *focus group* sur cet axe. Les habitants 4, 2 et 5 ont souhaité ajouter un commentaire en plus de leur positionnement.

Remarque par rapport à la démarche ACV :

- Habitant 1 : "Je pense en effet, qu'il faudrait pouvoir tout calculer. Mais c'est tellement énorme, que c'est parfois décourageant quoi. Il faudrait tout calculer pour bien prendre la mesure. Et quand je dis c'est énorme, il y a beaucoup beaucoup à calculer. Il y a en même temps une grande part d'impuissance dans ces calculs, car ce n'est pas possible de tout calculer, on est allé trop loin, trop vite, sans se rendre compte de ce que l'on faisait. Et... ensuite... que faire de ça ?"
- Habitant 2 : "Moi c'est pas du tout ça qui m'attire. Au contraire c'est plus une façon d'apprendre collaborative qui m'intéresse. D'où l'approche ACV que tu as que j'aime bien qui est une approche collaborative et qui n'est pas une approche où seuls des professionnels hyper calés peuvent faire ce boulot-là."
- Habitant 2 : "bah dans l'éco-hameau, l'impact que [l'ACV] peut avoir, c'est de prouver, c'est pas de montrer, mais prouver que [l'oasis] est une solution viable pour répondre aux problématiques que l'on a aujourd'hui et demain."

Conclusion sur les valeurs : Dans l'ensemble des entretiens, il est possible de trouver une forme de mélange entre les valeurs portées par les individus et les valeurs de l'éco-hameau. Cela est logique étant donné que les individus présents au sein de l'éco-hameau ont rejoint le projet car ils sont en cohérence avec les valeurs du projet.

L'ensemble des habitants ont eu un discours sceptique sur le rôle des techniques dans la résolution des problématiques écologiques.

Les valeurs que l'on retrouve pour l'ensemble des habitants sont : **autonomie** (choix en conscience, responsabilité de l'individu), **engagement dans un collectif** (le collectif donne de l'énergie aux individus pour porter des projets), **transparence** (dans le système de gouvernance et dans les données issues du mode de vie, par exemple l'empreinte environnementale de l'éco-hameau).

6.3.3 Résultats issus du *focus group* : centré sur les pratiques

La démarche d'analyse environnementale est une demande venant des habitants de l'éco-hameau. Un des objectifs des habitants est de démontrer que leur mode de vie est compatible avec un faible impact environnemental et un haut bien-être social (espace sûr et juste de [Raworth, 2017]). Ainsi, un des moyens pour les habitants de réaliser cette démonstration est de réaliser une analyse environnementale de leurs activités. La démarche d'analyse environnementale est donc, pour les habitants de l'éco-hameau, un moyen de prouver qu'un mode de vie dans l'espace sûr et juste est possible (verbatim correspondant à cet objectif : "il ne s'agit pas simplement de montrer mais de prouver" (Habitant 2), "montrer les possibles, inspirer, donner envie et... et ensuite ça suivra" (Habitant 4). Également, cette analyse environnementale viendrait répondre à un deuxième besoin : prendre des décisions en cohérence avec leurs objectifs d'impacts environnementaux dans leur quotidien. Les résultats sont décrits ci-dessous.

Expertises et expertise interactionnelle

Au cours de l'analyse qualitative et plus précisément le codage des entretiens, deux types d'expertise (non interactionnels) ont été identifiées : une expertise sur les systèmes industriels et une expertise sur les catégories d'impacts environnementaux. Tout d'abord, il s'agit de voir l'expertise autour des systèmes industriels.

Aucun des habitants n'avait de connaissance experte sur les processus industriels. Cependant, les habitants ayant le plus de connaissances sur le sujet étaient les plus à l'aise. Un niveau de connaissance minimum sur les systèmes et procédés industriels a été nécessaire pour la constitution de la nomenclature du système technique, le choix des données dans la base de données et la capacité à lier les systèmes industriels aux impacts environnementaux.

Quelques verbatim ont été recensés :

- "Habitant 1 : oui je vois qu'ils disent que les fibres végétales comme le lin sont de plus en plus utilisées pour diminuer l'impact... Par extrusion, injection ou thermo-moulage. Il faut peut-être trouver ces procédés.",
- "Habitant 1 : est-ce que tu as le processus laine de roche, indépendamment du matériau?",
- "Habitant 1 : alors déjà habitant 2 j'ai besoin que tu me confirmes, est-ce que c'est juste de dire que c'est du granulé? Euh le pare pluie polypropylène ce n'est pas juste de dire que c'est du granulé, c'est plutôt une bâche non? - Habitant 2 : c'est une bâche. - Habitant 1 : c'est pas du granulé, donc ça ne correspond pas à ce qui est écrit.",
- "Habitant 5 : ça va être hyper simple, l'un ou l'autre, une remorque ça va demander autant d'acier et de soudage et on va mettre en évidence que pour construire une structure en acier avec un volume d'acier, bah ça représente autant..."

L'expertise sur les catégories d'impacts environnementaux était nécessaire lors du choix de la méthode de calculs et donc des indicateurs environnementaux.

Cette montée en compétence dans ces deux domaines (systèmes industriels et environnementaux) ont-ils permis aux étudiants de développer une expertise interactionnelle? Il

est difficile via cette expérimentation de le savoir car je n'ai pas pu être présente lors des échanges entre les groupes et leurs commanditaires.

Rôle et gestion des données au cours de la démarche ACV

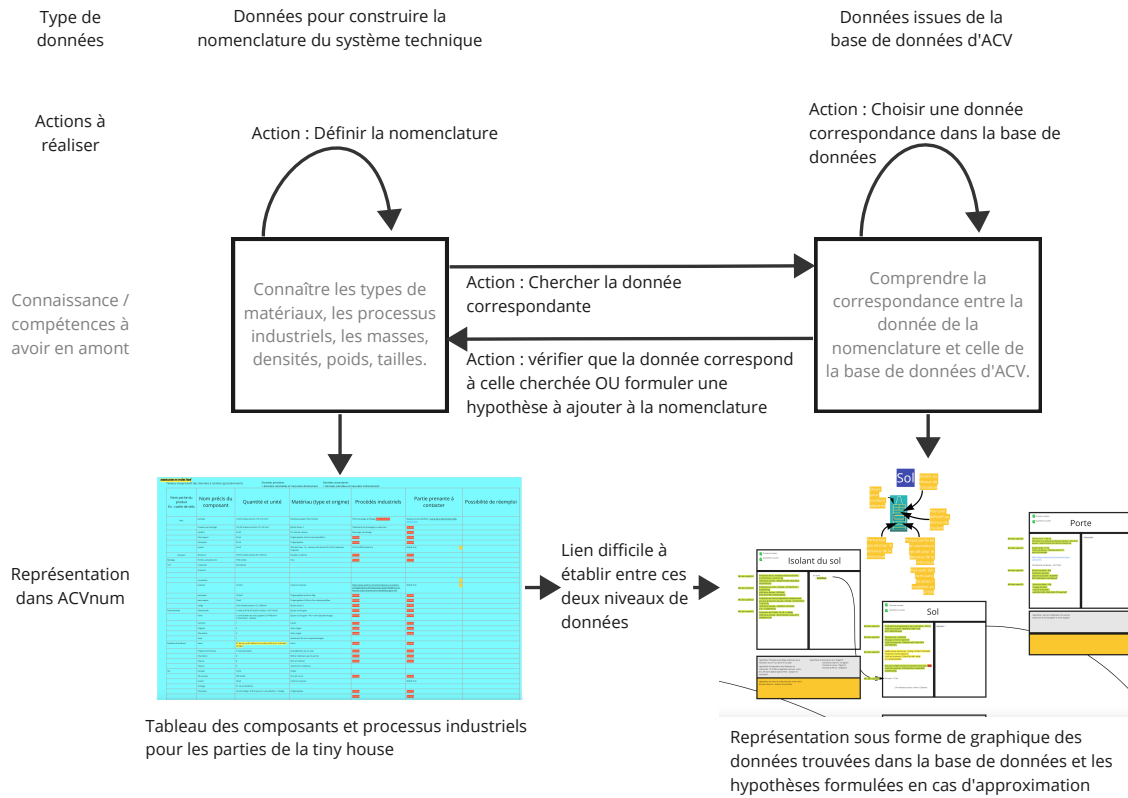


FIGURE 6.9 – Actions autour des bases de données réalisées au cours de la démarche ACV

Cette figure est composée de 4 niveaux horizontaux et se lit de haut en bas. Le premier niveau permet de définir le type de données (nomenclature à gauche et données de la base de données à droite). Le deuxième niveau concerne les actions à réaliser autour des données (chaque action est notée sur le schéma et commence par un verbe). Chaque carré représente l'expertise nécessaire pour manipuler les données en question. Le dernier niveau, au plus bas est appelé "Représentation dans ACVnum". Deux captures d'écran du prototype ACVnum ont été faites : le tableau en bleu représente la nomenclature du système technique et le schéma est une représentation du graphique du Model Graph disponible dans openLCA.

La question des données dans la démarche ACV arrive à deux niveaux : lors de la constitution de la nomenclature du système technique et lors du choix des données dans la base de données. Ces deux niveaux sont décrits dans la figure 6.9. Cette figure est composée de deux parties : la partie de gauche décrit les actions réalisées au niveau des données nécessaires pour la construction de la nomenclature du système technique. Les habitants devaient avoir une connaissance des types de matériaux, processus industriels en jeu, les masses des matériaux ou encore leur poids. De nombreuses recherches ont été réalisées et ont permis de compléter une nomenclature (image en bleu "représentation

dans ACVnum" - "Tableau des composants et processus industriels pour les parties de la Tiny House"). La partie à droite de l'image décrit les actions à réaliser dans la base de données d'ACV. Les habitants ont dû comprendre les données de la base de données et chercher une donnée correspondante à celle décrite dans la nomenclature.

Ce double niveau des données était complexe à comprendre pour les habitants et un découragement a été observé chez certains quand aucune donnée correspondante dans la base de données n'a pu être trouvée.

6.3.4 Résultats issus du *focus group* : centré sur les compétences

Un questionnaire autour des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité a été réalisé. Étant donné les résultats issus de la première expérimentation (6.2), il a été choisi de réaliser un entretien individuel avec chaque membre du *focus group* pour m'assurer que les réponses faites étaient centrées sur la démarche d'analyse de cycle de vie. Cette méthode a été en effet plus pertinente que les questionnaires remplis en autonomie. Cependant, ces questionnaires ont été réalisés uniquement au début de la démarche d'analyse de cycle de vie et n'ont pas été reconduits, étant donné que le prototype ACV allait être modifié.

Ainsi, dans ce questionnaire réalisé en début de démarche ACV, il est possible de voir que certains habitants ont eu des difficultés à comprendre les différences de périmètres entre les compétences. Certaines compétences comme la connaissance de soi ont été identifiées comme particulièrement larges et la description en décalage par rapport au titre. Ces difficultés ont été rencontrées uniquement avec les habitants sans background technique.

L'implication des habitants dans l'éco-hameau implique que leur niveau dans de nombreuses compétences est élevé (par rapport aux étudiants de l'expérimentation 1 par exemple). En effet, l'implication dans l'éco-hameau implique de repenser son mode de vie, d'être en prise avec des situations de transition locales et permettent de mettre en oeuvre, au quotidien, l'ensemble des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité.

6.3.5 Synthèse et conclusion de la récolte de données

Cette section est une synthèse de l'expérimentation 2. Le tableau 6.9 permet de rappeler à quelle question de recherche l'expérimentation permet en partie de répondre, l'objectif scientifique et les résultats.

Table 6.9: Synthèse des résultats issus de l'expérimentation en contexte de soutenabilité forte

Type	Description
Question de recherche	Quels sont les caractéristiques des outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ?
Objectifs scientifiques	Développer un cadre général autour des principes structurants des artefacts numériques pour la permaingénierie Proposer une médiatisation des principes structurants dans le cadre d'expérimentations
Expérimentation	Tester le prototype ACVnum (médiatisation de ma proposition) dans un contexte de transition écologique

Continued on next page

Table 6.9: Synthèse des résultats issus de l'expérimentation en contexte de soutenabilité forte (Continued)

Type	Description
Résultats issus des analyses des entretiens axés sur les valeurs	Des valeurs communes aux membres du <i>focus group</i> ont pu être définies, tout comme une vision commune de la technologie, permettant de positionner la vision des habitants proche de celle de sciences de l'ingénierie soutenable de [Seager et al., 2012] (la soutenabilité comme un problème complexe, multi-échelle, technologie pour la résilience et l'adaptation, avec une dimension participative).
Résultats issus des analyses des sessions du <i>focus group</i>	La démarche ACV a pu être conduite avec les membres du <i>focus group</i> et le prototype ACVnum a servi de support principal pour les échanges. Une difficulté au niveau de la maîtrise de l'interface est à noter pour les habitants les moins à l'aise avec les outils informatiques. La démarche ACV s'est révélée lourde pour le <i>focus group</i> . Des habitants ont rejoint la démarche au fur et à mesure des sessions, révélant un intérêt fort pour l'analyse environnementale. Cependant, les habitants ont exprimé le fait que la démarche était peu adaptée à leurs pratiques (lourdeur de la démarche, complexité des outils (prototype ACVnum et openLCA), difficulté à comprendre les données).
Résultats issus des analyses sur les compétences	Le mode questionnaire ne convient pas pour cette récolte de données (transformé en entretien au cours de l'expérimentation) et le périmètre des compétences est plutôt pour des personnes en prise avec des situations de conception de systèmes techniques.
Conclusion générale	Le contexte de l'expérimentation correspond bien à un contexte de soutenabilité forte. Une démarche ACV, supportée par l'outil collaboratif ACVnum, a été menée. Les résultats sont mitigés quant à la pertinence du prototype pour l'éco-village. Plusieurs raisons sont à évoquer : <ul style="list-style-type: none"> — Le prototype n'a pas permis aux habitants de s'appropriier la démarche ACV dans son ensemble ; — Les habitants ont des difficultés à comprendre les incertitudes liées à la modélisation réalisée (incertitudes liées aux choix dans la nomenclature et les données disponibles dans la base de données d'ACV) ; — La lenteur de la démarche est questionnée par rapport à l'urgence de la situation dans l'éco-hameau et la multitude de choix à réaliser au quotidien.

L'interprétation des résultats obtenus ainsi que les limites de cette expérimentation sont présentées dans le chapitre suivant.

Résultats et discussions

L'intelligence de l'histoire implique, il me semble, que nous acceptions que les véritables changements aient quelque chose de nécessairement invisible. Dans la mesure où c'est précisément cette invisibilité aux capteurs des dominants, à leur récupération prédatrice, qui leur offre l'espace et le temps indispensables pour se déployer.

[Damasio, 2019]

Les méthodes utilisées pour récolter et traiter des données issues des expérimentations ont été présentées dans le chapitre 5, ainsi que les résultats bruts obtenus. Le chapitre 7 a pour objectif de reprendre ces résultats et de les interpréter. L'expérimentation en contexte pédagogique est nommée expérimentation 1 et l'expérimentation dans un contexte de soutenabilité forte est nommée expérimentation 2. Les principaux résultats obtenus dans les expérimentations concernent l'adéquation entre le prototype ACVnum, les compétences des parties prenantes observées, leurs pratiques et valeurs. Les contradictions entre le besoin de collaboration exprimé par les étudiants et leur refus de collaborer en dehors de leur groupe projet sont étudiés au regard de l'état de l'art sur la collaboration.

Ces résultats, présentés dans le chapitre précédent, adressent des éléments d'éthique, de pratiques et de compétences. Ainsi, ces éléments peuvent être reliés au cadre de la permaingénierie (éthique, objectif, démarche, expertise). C'est la raison pour laquelle la section 7.1 est centrée sur la présentation des résultats en fonction des 4 caractéristiques de la permaingénierie. La section 7.2 a pour objectif de résumer les échanges et réaliser un bilan sur le cadre de la permaingénierie. La section 7.3 détaille les limites des expérimentations. Il s'agit dans ce chapitre de montrer les écarts entre le cadre de permaingénierie et ce qui est observé sur le terrain.

7.1 Discussion du cadre de la permaingénierie

Cette section a pour objectif de lier les résultats obtenus au cadre de la permaingénierie afin de comprendre dans quelle mesure la permaingénierie existe actuellement. L'accent est mis sur l'écart entre les observations et ce que devrait être la permaingénierie.

La figure 7.1 permet de rappeler le lien entre la question de recherche ciblée discutée dans cette thèse et les deux questions de recherche (QR) générales (présentées dans l'introduction). Il s'agit à présent de relier les connaissances produites aux caractéristiques de la permaingénierie. La question de recherche ciblée "Est-ce que le logiciel d'ACV est un artefact numérique correspondant aux valeurs, compétences et pratiques d'utilisateurs souhaitant aborder l'évaluation environnementale comme un outil d'aide à la conception pour des contextes de soutenabilité forte?" a permis de produire plusieurs types de connaissances. Chacune de ces connaissances a permis d'alimenter une des caractéristiques de la permaingénierie. Ces connaissances nous ont permis de tester le cadre général des artefacts numériques pour la permaingénierie. Ces éléments sont directement reliés à la question de recherche N°2 (QR 2) "Quels sont les outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique?" Cette question alimente la question de recherche N°1 (QR 1) : "Dans un contexte de transition écologique, dans quelle mesure l'ingénierie peut-elle évoluer vers d'autres manières d'être et d'être pratiquée?"

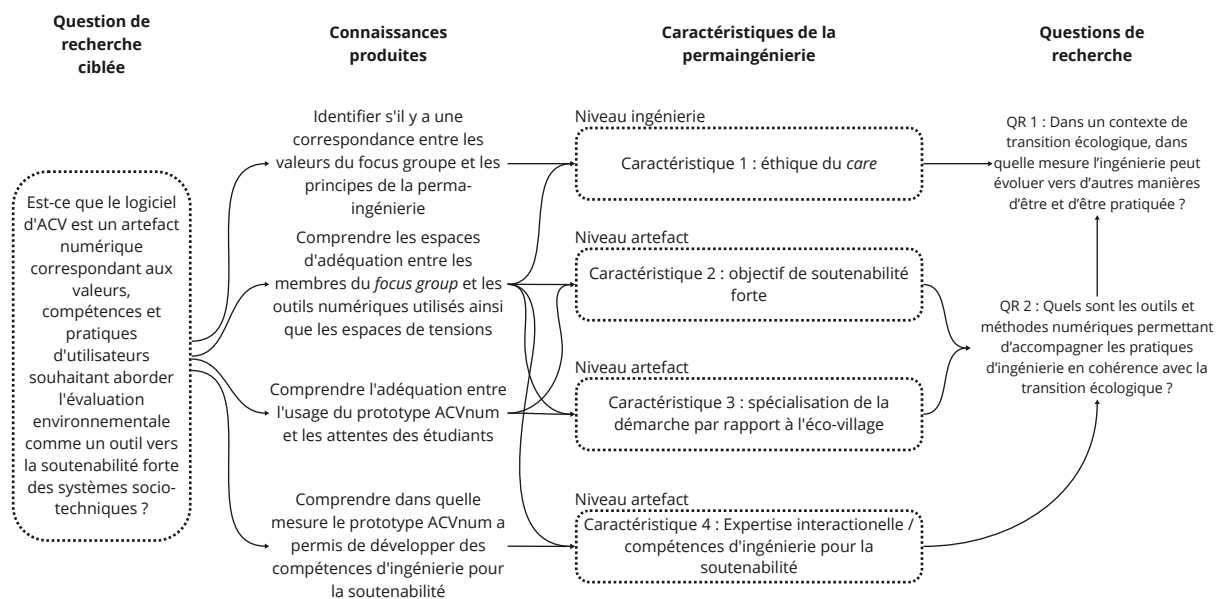


FIGURE 7.1 – Lien entre les connaissances produites et les caractéristiques de la permaingénierie

La figure permet de relier la question de recherche ciblée aux questions de recherche via les connaissances produites et reliées aux 4 caractéristiques de la permaingénierie.

Chaque sous-section est dédiée à une caractéristique de la permaingénierie.

7.1.1 Caractéristique 1 : éthique du *care*

Pour rappel, la caractéristique 1 définie dans le chapitre 4 pour les artefacts numériques est la suivante :

Caractéristique 1 : Un artefact qui médiatise l'éthique du care

- (a) *Un système qui questionne son domaine d'application*
- (b) *Un système qui ne bloque pas l'action*

Ces caractéristiques sont discutées au cours de la section.

Cette section est centrée sur l'éthique du *care* comme cadre éthique de la permaingénierie et permet de poser la question suivante : Est-ce que le cadre éthique proposé dans la permaingénierie peut convenir à des acteurs voulant travailler dans la conception de systèmes techniques dans des contextes de soutenabilité forte ?

Les expérimentations menées se sont centrées sur l'analyse des compétences et des valeurs, sans forcément adresser directement la notion d'éthique. L'éthique des parties prenantes des expérimentations (étudiants pour l'expérimentation 1 et habitants de l'éco-hameau pour l'expérimentation 2) n'a pas été précisément identifiée. Cela constitue bien entendu une limite à ma capacité à définir l'éthique portée par les membres des expérimentations.

Cependant, des éléments contradictoires sont à relever dans les expérimentations, en lien avec l'éthique du *care*. La première sous-section est centrée sur l'expérimentation 1, avec un focus sur les contradictions entre les réponses aux questionnaires des étudiants et leurs réactions vis-à-vis de leur commanditaire. La deuxième sous-section est centrée sur l'expérimentation 2, avec un focus sur les concepts d'empathie et de bienveillance.

Expérimentation 1

Deux observations ont été faites en lien avec l'éthique du *care* : l'épistémologie en ingénierie et la place de la collaboration dans les pratiques d'ingénierie observées.

Épistémologie de l'ingénierie

Dans les réponses aux questionnaires (Qu1 notamment), les étudiants ont remis en cause l'épistémologie positiviste portée par l'ingénierie contemporaine [Walther et al., 2020]. L'épistémologie positiviste est définie comme la croyance en un monde stable et une vérité universelle qui transcende l'interprétation humaine. Je souhaite montrer que les étudiants, bien qu'ayant formulé cette remise en cause dans leurs réponses aux questionnaires, n'ont pas réussi à se détacher de cette épistémologie dans leur pratique.

Dans les réponses des étudiants, il est possible de voir une remise en cause du caractère neutre et techno-centré de l'ingénierie :

- "En acculturant l'ingénieur aux [sciences humaines et sociales] et aux sciences de la soutenabilité, on le met face à ses contradictions et ses connaissances et compétences peuvent permettre la transformation de la société" (Étudiant groupe témoin) ;
- "La technologie ne peut qu'au mieux repousser le problème (sans évoquer les effets rebonds éventuels qu'impliquent généralement l'implémentation de nouvelles technologies - démontré en particulier dans le domaine de l'énergie)" (Étudiant groupe témoin) ;

- "Ainsi, je pense que la place de l'ingénieur dans la transition écologique est d'offrir des solutions éthiques en se servant des technologies sans plus viser le progrès mais la responsabilité environnementale et humaine" (Étudiant groupe témoin) ;
- "Je vois plus l'ingénieur dans un rôle d'accompagnement de processus de transition, avec à la fois une culture technique mais aussi une connaissance des enjeux du territoire en question, lui permettant de dialoguer faire le lien entre différents acteurs" (Étudiant groupe ACVnum) ;
- "L'ingénieur est donc une personne qui peut fournir des outils et innovations pour aider la société à migrer vers l'écologie, mais il n'est pas à lui seul la solution" (Étudiant groupe ACVnum) ;
- "Pour moi l'ingénieur doit avoir une vision plus globale des systèmes et ainsi pouvoir innover en prenant en compte (le mieux possible) les répercussions positives et négatives de ses projets" (Étudiant groupe ACVnum).

Les réponses sélectionnées sont celles d'étudiants ayant suivi un cursus d'ingénierie de deuxième cycle à l'Université de Technologie de Troyes. Ces citations sont présentes autant dans les groupes témoins que dans les groupes ACVnum. Il semble que l'écart entre : (1) un discours mainstream qui continue à entretenir une vision "neutre" de l'ingénierie et (2) la vision socio-technique de l'ingénierie des étudiants ne cesse de grandir¹. Les étudiants, bien qu'ayant des croyances dans le fait que l'ingénierie doit être engagée et peut être compatible avec la transition écologique, expérimentent le fait de ne pas avoir assez développé de pratiques ou de compétences cohérentes avec cette vision engagée de l'ingénierie au cours de leur cursus.

Les étudiants ont exprimé une remise en cause de l'épistémologie positiviste présente dans les formations d'ingénierie. Dans leurs discours, ils se sont montrés proches d'une épistémologie constructiviste. Cependant, dans la réalisation d'une démarche d'ACV, la situation était inverse : les étudiants abordaient une démarche positiviste et se montraient sceptiques vis-à-vis des démarches constructivistes. En effet, les étudiants posaient des questions binaires sur des éléments où l'enseignant ne pouvait pas répondre oui/non. Si l'on prend l'exemple de la construction et la validation de l'unité fonctionnelle en ACV, les groupes projets demandaient la validation de cette unité fonctionnelle à l'enseignant, sans vérifier la cohérence entre le besoin du commanditaire et leur proposition. De plus, les groupes ne voyaient pas l'intérêt de réaliser cette vérification auprès de leur commanditaire.

Comme vu dans le chapitre 2, l'ingénierie est composée de 4 facettes : les sciences sociales, les sciences, la conception et l'action (la réalisation pratique). Ces 4 facettes ont historiquement des épistémologies différentes (positiviste principalement pour les sciences alors que l'épistémologie dans les sciences sociales peut être constructiviste, interprétativiste, positiviste, etc). Ainsi, l'épistémologie de l'ingénieur est influencée par celle de ses 4 facettes [Figueiredo, 2008] et non uniquement l'épistémologie positiviste issue des sciences. Cependant, la place des sciences est prédominante dans les formations d'ingénierie et peut amener à une sur-représentation de l'épistémologie positiviste dans les formations².

1. "La dissonance entre ses convictions écologistes d'une part, et une identité professionnelle définie par des ambitions jugées prométhéennes et anthropocentrées d'autre part, peut ainsi donner lieu à un processus de désaffiliation." [Bouzin, 2021]

2. Il existe des débats autour de l'épistémologie en ingénierie, par exemple le débat entre [Potts and Newstetter, 1997] et [Hinds, 2008] sur la place du positivisme dans l'ingénierie des exigences.

Difficile collaboration

Deux éléments importants ont été relevés sur les questions de collaboration, allant à l'encontre d'une éthique du *care* :

- Manque d'appétence pour la collaboration ;
- Manque d'empathie dans la collaboration.

Le manque d'appétence pour la collaboration n'est pas apparu entre les membres des groupes projet mais entre les membres des groupes projets et leur commanditaire. Plus qu'un manque d'appétence pour la collaboration, certains groupes sont allés jusqu'à refuser la collaboration (groupe ACVnum-3) ou en ont eu peur (groupe ACVnum-1). Cette problématique de collaboration sera discutée dans la section 7.1.4, à propos des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité (notamment à propos de la compétence normative).

Ainsi, malgré une vision socio-technique de l'ingénierie des étudiants, il semble qu'ils ont eu des difficultés à mettre en oeuvre une collaboration entre les parties prenantes, nécessaires dans une transition soutenable des systèmes socio-techniques. Comment ce décalage entre leurs croyances et leurs pratiques peut-il être expliqué ?

Une étude menée par [Cech, 2014] montre que les ingénieurs ont tendance à favoriser les apprentissages techniques au fur et à mesure de leur formation : "Ces aspects culturels (questions éthiques et sociales, implications politiques de l'ingénierie, formation générale et compétences rédactionnelles) sont perçus comme moins essentiels aux programmes d'ingénierie des répondants que les facteurs "techniques" tels que les compétences de base en mathématiques et en sciences ou l'avancement des connaissances scientifiques". [Cech, 2014] conclut "Il semble, en d'autres termes, qu'une culture de désengagement soit en place dans ces écoles et que cette culture soit liée au faible engagement des étudiants envers les considérations de bien-être public." D'autres études comme [Walther et al., 2020] montrent que l'empathie n'est pas systématique chez les ingénieurs en formation.

Comme cela sera montré dans les sections 7.1.3 et 7.1.4, la collaboration et la capacité à exprimer de l'empathie a été difficile à mettre en oeuvre pour les étudiants. Ainsi, les étudiants ont intégré un discours autour de l'ingénierie responsable en lien avec les enjeux écologiques. Mais la pratique de cette ingénierie responsable n'ayant pas été apprise, elle n'est pas ressortie des actions des étudiants observés en situation d'ingénierie pour la soutenabilité.

Expérimentation 2

Lors des entretiens individuels réalisés avec les membres du *focus group*, certains verbatims peuvent être reliés à une éthique du *care*.

L'un des éléments primordial du *care* est la capacité d'empathie. Ce n'est pas l'empathie qui a été décrite le plus souvent dans les entretiens mais la sidération vis-à-vis de l'absence d'empathie entre les humains et entre les humains et non-humains. Les citations correspondantes à ce constat sont les suivantes :

- "Donc là-dedans, il y a la notion de communs, de ce qui fait commun. On n'est pas sur la notion d'intérêt individualiste, même si on est dans le prendre soin des humains. C'est plus dans l'idée d'être au service de ce qui fait l'humanité et au service de ce qui fait la vie dans sa biodiversité" (Habitant 1) ;

- "Non je ne dis pas que c'est incompatible [la technologie et l'écologie]. Je dis que l'on pousse trop... on voit trop la technologie comme un remède mais après il faut choisir la bonne techno aussi. Je ne crache pas du tout sur la haute technologie elle a des avantages qui ne sont pas comparables c'est sûr. Mais il faut faire attention à quelle techno tu utilises et pour répondre à quel besoin. Est-ce que c'est un besoin essentiel ou un besoin superficiel..." (Habitant 2) ;
- "C'est difficile et donc dans mon idéal je me suis dit qu'il fallait évoluer dans un endroit où les gens allaient être bienveillants. Tu vois c'était un peu mon crédo initial. La bienveillance en fait, communiquer autrement, être en relation avec les autres de manière différente quoi. C'était ça ma porte d'entrée [dans l'éco-hameau]" (Habitant 3) ;
- "Tout à fait, c'est un moyen et non un but. L'objectif n'est pas de technologiser l'[éco-hameau] pour en faire quelque chose. L'[éco-hameau] a des objectifs, une vision de là où il veut aller, avec quelle posture humaine il veut aller. Et je pose la question de comment un ingénieur peut s'intégrer là-dedans, comment il peut se transformer." (Habitant 5).

Dans le contexte de cette deuxième expérimentation, les habitants ont décrit un besoin de bien-être au sein de l'éco-hameau. De plus, comme vu dans les résultats décrit dans le chapitre 5, les habitants ont exprimé un besoin de concevoir et d'utiliser une technologie en cohérence avec les objectifs écologiques de l'éco-hameau.

Les propos des habitants sur l'éthique du *care* et la bienveillance ne sont pas spécifiquement liés à la position de l'ingénieur (Habitant 3 par exemple). Le discours autour de la sobriété dans la technologie est intégré par les habitants mais la capacité à concevoir des technologies en cohérence avec les valeurs écologiques reste limitée. En effet, les habitants parlent des low-tech mais ne savent pas comment les concevoir, ni ce qui caractérise les low-tech (manque de connaissances sur les méthodes de conception par exemple).

Conclusion sur le cadre théorique : Une éthique du *care* semble être partagée par les futurs praticiens de la permaingénierie. Cependant, il existe un écart entre le discours des parties prenantes des expérimentations (soutenabilité forte) et leurs pratiques (soutenabilité faible). Ainsi, une éthique du *care* est identifiée dans le discours des parties prenantes des expérimentations (étudiants, habitants) sans que cette éthique se retrouve dans leurs pratiques.

Conclusion sur les artefacts numériques : il semble que les caractéristiques 1a et 1b ^a des artefacts de la permaingénierie n'ont pas été "vérifiées" dans cette section. Elles seront discutées dans la section suivante sur la caractéristique 2 de la permaingénierie).

Gap : Il existe un écart entre l'appropriation d'une éthique du *care* visible dans le discours des acteurs de la permaingénierie et la mise en oeuvre de cette éthique dans des situations d'ingénierie pour la soutenabilité.

a. Pour rappel, la caractéristique 1a définie dans le chapitre 4 est "Un système qui questionne son domaine d'application (est-ce que ça a du sens de réaliser une analyse environnementale pour ce que l'on est en train de faire)" et la caractéristique 1b est "Un système qui ne bloque pas l'action"

7.1.2 Caractéristique 2 : objectif de soutenabilité forte

Pour rappel, la caractéristique 2 définie dans le chapitre 4 pour les artefacts numériques est la suivante :

Caractéristique 2 : Un objectif de soutenabilité forte

(a) *Un système qui fait le lien entre les activités locales et les impacts environnementaux*

Cette caractéristique est discutée au cours de la section.

Est-ce que l'objectif de soutenabilité forte était partagé par les parties prenantes des expérimentations (étudiants, habitants) ? Est-ce que la démarche ACV a permis d'assurer un retour dans les limites planétaires des activités humaines étudiées ? Ces deux questions permettent d'aborder le cadre de la permaingénierie au niveau théorique et au niveau des artefacts numériques. Cette section vise à comprendre si les expérimentations se situaient dans des contextes de soutenabilité forte.

Expérimentation 1

La première expérimentation s'est focalisée sur des étudiants qui partageaient une vision forte de la soutenabilité. En effet, les étudiants avaient tous connaissance des limites planétaires (modèle de [Steffen et al., 2015b]), une compréhension de la soutenabilité comme un problème complexe, un objectif de transformer la société vers une trajectoire plus soutenable. La soutenabilité était comprise comme une problématique multi-critères (climat, biodiversité, cycles biogéochimiques, manque de ressources, pollution, etc), à laquelle l'ingénierie peut en partie répondre (mais de manière non-isolée). Un des objectifs des étudiants à travers leur projet d'ACV était d'avoir un impact réel de transformation sur leur commanditaire.

L'ACV n'a pas été perçue comme une démarche réellement hors du périmètre de l'ingénierie pour la soutenabilité. La plupart des étudiants sont plutôt favorables à l'usage de l'ACV dans le sens où ils y voient un intérêt pour la transition écologique (évaluation des impacts pour la prise de décision dans un processus de conception). Cependant, cette adhésion à la démarche ACV n'est pas totale et de nombreuses réticences ont été formulées par les étudiants. Voici quelques citations issues de réponses à la question "Quelle est la place de l'ACV dans la transition écologique ?" :

- "C'est un outil d'analyse qui permet au début d'un projet de se rendre compte des impacts d'un produit ou d'un service puis plus tard de vérifier si les actions menées ont permis de réduire ces impacts et s'assurer qu'il n'y ai pas eu de transfert des impacts" ;
- "L'ACV est un outil utile pour mieux cerner les impacts potentiels sur la biosphère d'un produit. Néanmoins, il reste aussi limité à son unité fonctionnelle, il n'est pas accessible pour des néophytes et implique de prendre du recul, de porter un regard critique qu'il faut se forger. Il comporte aussi à mon sens un certain nombre d'incertitudes en lien avec la collecte des données, la base de données, les modèles mathématiques etc. Il tendra je présume à s'améliorer avec l'évolution des logiciels, des modèles et méthodes sous-jacents et l'apport de la recherche scientifique" ;
- "Je pense que l'ACV est un bon outil pour mieux comprendre les systèmes et en avoir une vision globale et complète. C'est un outil qui pourra permettre d'éviter de foncer

dans des solutions paraissant mieux sur certains aspects alors qu'elles empireront le problème sur d'autres. Je pense que c'est un bon outil pour prendre de la hauteur et pour discuter des problématiques et potentielles solutions. Cependant j'ai aussi l'impression qu'il est assez limité et pas assez exploité";

- "L'ACV c'est pour moi un outil à considérer dans de nombreux projet. Il permet de mettre en avant le côté systémique et est un bon outil de dialogue si l'on sait en adapter le niveau de détail. L'usage est cependant aujourd'hui dépendant de banques de données et logiciels qui ne sont pas accessibles aux petites et moyennes entreprises. D'autres outils peuvent aussi être utilisés en complément de l'ACV";
- "L'ACV permet de comprendre la source des impacts d'un produit ou un service. C'est un outil utile dans un processus d'amélioration continu. Ça reste selon moi un outil qui ne permet pas de faire changer la soutenabilité de notre système économique, et qui n'implémente pas de changement majeur dans la transition écologique";
- "Au risque de vous décevoir ... Selon moi, [ce] n'est pas assez. C'est un bon début, quelque chose de concret à proposer aux entreprises, concepteurs etc, mais au vu du temps de réalisation d'une étude comparé au peu de temps d'action ...".

Il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure la mise en oeuvre d'une démarche ACV a concrètement impacté les organisations. Cependant, un objectif d'agir vers une transition soutenabilité forte était partagé par les étudiants de la classe (cf résultats présentés au chapitre précédent).

Expérimentation 2

Le retour dans les limites planétaires fait partie de la raison d'être de l'éco-hameau. Ainsi, l'objectif de soutenabilité forte était partagé par les membres du *focus group*.

La démarche d'ACV était connue uniquement de la moitié des membres du *focus group*. Étant donné que les décisions sont prises collectivement, il est difficile aujourd'hui de dire comment l'éco-hameau va s'approprier la démarche ACV pour s'assurer que ses activités rentrent dans le cadre des limites planétaires. Il est néanmoins possible de noter que la démarche ACV a incité les membres de l'éco-hameau à initier des discussions sur la thématique de l'évaluation environnementale. Les habitants se sont questionnés sur l'impact environnemental de leurs pratiques de conception ou leurs politiques d'achat. Ainsi, la démarche ACV, bien que centrée sur une tiny house, a fait naître des échanges autour d'autres systèmes techniques présents au sein de l'éco-hameau.

Cependant, lors de la séance de conclusion de la première itération de la démarche d'ACV, les habitants ont émis des critiques fondamentales sur l'ACV. Les habitants ne se sentent pas d'utiliser cet outil sans accompagnement et se posent des questions quant à la cohérence entre l'ACV et la réalité de leur quotidien.

Conclusion sur le cadre théorique : Les parties prenantes directes des expérimentations s’ancrent dans un paradigme de soutenabilité forte.

Les parties prenantes affirment que l’ACV peut accompagner la prise de décision dans des processus de conception. Cependant, ces mêmes parties prenantes critiquent le manque de facilité d’usage de la méthode ACV et des logiciels associés.

Conclusion sur les artefacts numériques : les caractéristiques 1a et 1b définies dans le chapitre 4 correspondent plutôt à la caractéristique 2 du cadre de permaingénierie au niveau des artefacts numériques. La mise à jour complète du cadre de permaingénierie au niveau des artefacts est détaillée à la section 7.2.

Gap : Les parties prenantes ont exprimé des limites à l’usage de la méthode ACV dans leur contexte. Même si les limites de cette méthode sont connues, la compréhension du rôle de l’ACV dans le retour des activités dans le cadre des limites planétaires est limitée.

7.1.3 Caractéristique 3 : interaction des activités d’ingénierie avec une multitude de systèmes (milieux)

Cette section a pour objectif de définir dans quelle mesure les activités d’ingénierie doivent être intégrées à un *milieu*, c’est-à-dire à un ensemble de systèmes situés en collaboration les uns avec les autres. Ainsi, le concept de collaboration va être au centre de cette section. Pourquoi ? Comme expliqué dans le chapitre 4, une activité de permaingénierie doit être réalisée en interaction avec les différents systèmes d’un espace dédié. Plus qu’une interaction, il a été choisi d’assurer que la permaingénierie est une activité de collaboration entre le permaingénieur et les systèmes en prise avec ses activités. Comment la collaboration peut-elle être mise en place dans des activités d’ingénierie pour la soutenabilité, dans une perspective de soutenabilité forte ? C’est la raison pour laquelle cette section est centrée autour des problématiques de collaboration rencontrées lors des expérimentations.

Avant de commencer cette section, je souhaite donner la définition de la collaboration et de celle d’un groupe projet :

- La collaboration est comprise comme une activité dont le succès est atteint lorsque nous avons accompli quelque chose en groupe qui n’aurait pas pu être accompli par un individu [Kvan, 2000]. La collaboration ne doit pas être confondue avec la coopération ou la coordination³ ;

3. "La coopération se caractérise par des relations informelles qui existent sans mission, structure ou effort défini en commun. Les informations sont partagées selon les besoins et l’autorité est conservée par chaque organisation, de sorte qu’il n’y a pratiquement aucun risque. Les ressources sont distinctes, tout comme les récompenses.

La coordination se caractérise par des relations plus formelles et la compréhension de missions compatibles. Une certaine planification et une répartition des rôles sont nécessaires, et des canaux de communication sont établis. L’autorité appartient toujours à l’organisation individuelle, mais il y a un certain risque accru pour tous les participants. Les ressources sont disponibles pour les participants et les récompenses sont mutuellement reconnues.

La collaboration suppose une relation plus durable et plus étendue. Les collaborations étant ... (a) un engagement total envers une mission commune ... L’autorité est déterminée par la structure de collaboration. Le risque est beaucoup plus grand." [Kvan, 2000]

- Un groupe est composé d’au moins trois personnes, et peut s’identifier en tant que groupe. De plus, il peut être identifié par les autres de l’organisation en tant que groupe [Sbea and Guzzo, 1987, p.1].

L’objectif de cette section est de comprendre pourquoi la collaboration a été difficile dans les expérimentations. Dans un premier temps, il s’agit de comprendre le lien entre les barrières à la mise en place de la démarche d’ACV et la collaboration en ACV. Dans un deuxième temps, la perception de la collaboration comme un risque est abordée (centrée sur l’expérimentation 1). De cette perception de la collaboration comme un risque, je tente de formuler des hypothèses pour expliquer les difficultés des étudiants à collaborer à travers le prototype ACVnum.

Pour rappel, la caractéristique 3 définie dans le chapitre 4 pour les artefacts numériques est la suivante :

Caractéristique 3 : Une activité d’ingénierie qui devient spécifique aux contextes locaux

- (a) *Un système convivial*
- (b) *Un système collaboratif*
- (c) *Un système pour l’apprentissage*
- (d) *Un système modifiable*

La difficulté de collaborer entre les parties prenantes dans les démarches d’ACV

Et si les difficultés de collaboration ne sont pas dues aux acteurs de la démarche ACV mais inhérents à la démarche ACV elle-même ?

La collaboration dans les démarches d’ACV a été étudiée par de nombreuses études. Par exemple [Lozano, 2015] montre que les approches collaboratives (pas forcément uniquement les approches d’analyse environnementale) peuvent aider les petites et moyennes entreprises pour consolider leur stratégie sur les enjeux écologiques.

De nombreuses analyses ont identifié les barrières limitant l’usage de l’ACV. Ces barrières sont structurées en 2 catégories : les barrières techniques et non-techniques par [Testa et al., 2022]. Ces barrières ne sont pas forcément liées aux problématiques de collaboration mais peuvent avoir un impact sur celle-ci.

Les barrières techniques de l’ACV et les implications au niveau de la collaboration sont présentées dans le tableau 7.1. Cette synthèse des barrières techniques permet de mettre en évidence la difficulté de la gestion des données (collecte et compréhension de leur niveau de qualité) menant à un possible manque de confiance dans les résultats de l’ACV. La technicité de la démarche (expertise nécessaire) rend également l’ACV peu accessible pour les non-experts.

Table 7.1: Barrières techniques à l'usage de l'ACV et les implications pour la collaboration en ACV

Barrières techniques en ACV	Impact sur la collaboration	Lien avec les caractéristiques de la permaingénierie
Manque de qualité dans les données. Manque d'outils présents et utilisables pour assurer une qualité satisfaisante des données ("It is obvious that some kind of tools to address data quality and uncertainty are needed. But it is also obvious that it must not be too complex", [Björklund, 2002]).	Ce manque de qualité peut être un frein pour des non-experts pour rejoindre la démarche ACV : difficulté pour les non-experts à identifier les différents niveaux de qualité des données et donc savoir où affiner les recherches pour choisir d'autres données ou bien savoir comment analyser les résultats.	Capacité de compréhension : renvoie à la notion de complexité et de convivialité (caractéristique 3a).
Absence de connaissances techniques généralisées	Ce manque de connaissances peut être un frein à la participation car différentes expertises sont nécessaires pour comprendre et suivre l'ensemble de la démarche (expertise industrielle et environnementale). Cela peut être compensé par des sessions de formation.	Manque de connaissances : renvoie à la notion d'apprentissage (caractéristique 3c).
Manque de confiance dans le processus et les résultats de l'ACV	La complexité des processus et le manque de clarté sur le niveau de qualité de chaque donnée rend les résultats difficilement lisibles pour les personnes n'ayant pas participé pleinement aux différentes étapes de la démarche.	Capacité de compréhension : renvoie à la notion de complexité et de convivialité (caractéristique 3a).
Efforts nécessaires à la collecte de données primaires (à l'intérieur et à l'extérieur des frontières des organisations). Exemple : "The owner or operator of the activity has little or no previous experience in doing such compilations—traditionally, environmental data is recorded, if at all, on an organizational level rather than on a function level. Similarly, the LCA practitioner may have little previous knowledge of the process for which data is to be compiled. A process of mutual learning and awareness raising has to take place." [Rebitzer et al., 2004]	Une collaboration entre plusieurs parties prenantes peut rendre difficile la collecte de données car cela nécessite une expertise interactionnelle.	Renvoie à la capacité à collaborer entre plusieurs systèmes (caractéristique 3b).

Continued on next page

Table 7.1: Barrières techniques à l’usage de l’ACV et les implications pour la collaboration en ACV (Continued)

Barrières techniques en ACV	Impact sur la collaboration	Lien avec les caractéristiques de la permaingénierie
Disponibilité d’outils efficaces et conviviaux pour l’analyse et la (re)conception [Buttol et al., 2012]	L’absence de ces outils rend difficile la possibilité pour des non-experts de s’approprier les résultats d’ACV pour l’analyse et la proposition de reconception du système technique étudié.	Capacité de compréhension : renvoie à la notion de complexité et de convivialité (caractéristique 3a).

Table 7.2: Barrières non-techniques à l’usage de l’ACV et les implications pour la collaboration en ACV

Barrières non techniques en ACV	Impact sur la collaboration	Lien avec les caractéristiques de la permaingénierie
Manque de temps : [Nakano and Hirao, 2011] montrent que la récolte de données dans les démarches d’ACV nécessite du temps.	La collaboration peut être perçue comme un effort supplémentaire, difficile à réaliser lorsque le temps pour réaliser l’ACV est court. Le risque porté par la collaboration peut être un frein à sa mise en oeuvre.	Renvoie à la collaboration donc à la caractéristique 3a.
Manque de ressources : [Nakano and Hirao, 2011] montrent que la récolte de données dans les démarches d’ACV nécessite une confiance entre les parties prenantes de la chaîne de production, des connaissances spécifiques, etc.	La collaboration peut être perçue comme un effort supplémentaire, difficile à réaliser lorsque les ressources sont faibles. Le risque porté par la collaboration peut être un frein à sa mise en oeuvre. A l’inverse, cette collaboration peut amener d’autres ressources au projet (individus prêts à s’intégrer à la démarche par exemple).	Renvoie à la collaboration donc à la caractéristique 3a.
Culture de l’organisation	-	Renvoie à la collaboration donc à la caractéristique 3a et à la notion d’adéquation entre le systèmes technique et la culture de l’organisation (caractéristique 3d).
Collaboration avec d’autres organisations intervenant le long de la chaîne de valeur, pour le partage de données environnementales [Nakano and Hirao, 2011]	-	Renvoie à la collaboration donc à la caractéristique 3a.

Grâce à ces éléments, il est possible d’affirmer que la démarche ACV est difficile à appréhender pour des non-experts et rend difficile la collaboration entre multiples parties prenantes (numéroté hypothèse 1 sur le manque de collaboration dans la conclusion de la section). Le prototype ACVnum a adressé la collecte des données de manière assez classique (tableau pour mettre les données par exemple). Il est donc cohérent que les

problématiques rencontrées lors de l’usage du prototype ACVnum soient les mêmes que celles évoquées dans le tableau 7.1 avec des logiciels d’ACV classiques.

Les difficultés à collaborer ne sont pas uniquement dues à la démarche ACV. C’est ce qui va être discuté dans la prochaine section.

La collaboration perçue comme un risque (expérimentation 1)

L’objectif de cette section est de comprendre quels sont les éléments (en dehors de la démarche ACV) ayant limité la collaboration dans les expérimentations. Cette analyse porte principalement sur l’expérimentation 1.

Rappel du contexte

Le prototype ACVnum a mis les groupes d’étudiants dans une situation où ils devaient se rapprocher de leur commanditaire afin que leur travail réponde à leurs enjeux. Lors des échanges au début du semestre, j’ai demandé à l’ensemble des groupes (témoins et ACVnum), de se rapprocher de leurs commanditaires afin de construire avec eux l’unité fonctionnelle, la nomenclature du produit, choisir les indicateurs d’impacts à afficher dans les résultats. Les groupes témoins n’ont pas eu de réactions particulières à cette demande de rapprochement avec leur commanditaire. Certains groupes témoins ont émis des doutes quant à l’intérêt porté par leur commanditaire pour leur travail mais n’ont pas questionné la démarche de collaboration. Certains groupes témoins ont effectivement travaillé avec leur commanditaire tandis que d’autres n’ont eu que très peu de contacts avec lui (1 mail au cours du semestre). Par différence, lorsque j’ai demandé à certains groupes ACVnum de réaliser ce rapprochement avec leur commanditaire en utilisant le prototype ACVnum en support à cette démarche collaboration, des réactions assez fortes ont été observées. Un groupe en particulier a d’abord refusé catégoriquement d’utiliser le prototype ACVnum avec leur commanditaire, avant d’accepter. Cependant, les sessions de collaboration ont eu lieu uniquement lorsque j’ai organisé la séance de rencontre et ai été présente pendant le rendez-vous pour désamorcer les possibles tensions. En résumé, les groupes témoins comme les groupes ACVnum ont eu peu de contact avec leur commanditaire, limitant ainsi la collaboration. D’où peut venir le manque de volonté à collaborer ?

Interprétation 1 : des facteurs de succès non réunis

Je fais l’hypothèse que le refus de collaboration vient du contexte pédagogique mis en place (numéroté hypothèse 2 sur le manque de collaboration dans la conclusion de cette section). En effet, la démarche d’ACV était réalisée en parallèle d’une démarche d’éco-conception, dans une autre unité d’enseignement. La démarche d’éco-conception a commencé en amont de la démarche d’ACV et a été réalisée sans collaboration avec les parties prenantes. Ainsi, la demande de collaboration avec les parties prenantes était différente entre les deux démarches, rendant la situation difficile à comprendre pour les étudiants.

La littérature sur la collaboration supportée par des artefacts numériques montre, notamment grâce à [Sbea and Guzzo, 1987], que trois éléments déterminent le succès d’un groupe :

- L’interdépendance des tâches (l’intensité de la collaboration entre les membres du groupe) ;
- L’interdépendance des résultats (si et comment la performance du groupe est récompensée) ;

— La puissance du groupe (la conviction des membres que le groupe peut être efficace).

Avec cette grille de lecture, il est possible de montrer que l'échec de la collaboration peut être en partie dû au prototype ACVnum lui-même (hypothèse 3 sur le manque de collaboration dans la conclusion de cette section).

Par rapport à l'interdépendance des tâches⁴ : il semble que les activités observées ont été réalisées de manière séquentielle. Par exemple, la définition de l'unité fonctionnelle de l'ACV ne pouvait être faite qu'en collaboration entre l'équipe projet et le commanditaire (activité collaborative où le commanditaire peut exprimer son besoin, détailler ses contraintes). Cependant, certains groupes ont pré-établi une unité fonctionnelle qui a été ensuite validée par le commanditaire (deux activités où le groupe projet travaille ensemble sans le commanditaire, puis soumet une proposition au commanditaire pour validation, collaboration limitée).

Un autre exemple concerne l'activité de définition de la nomenclature produit. Cette activité a été réalisée par le groupe projet. Les informations précises sur le système technique étaient données par le commanditaire, suite à des recherches en interne de l'entreprise (activités séparées du groupe projet). Le choix des données dans la base de données d'ACV, le lancement des calculs et l'analyse des résultats ont été réalisés uniquement par les étudiants (pas de collaboration avec le commanditaire jugée nécessaire). Ainsi, les activités du groupe projet et du commanditaire en lien avec l'ACV étaient plutôt séquentielles et les moments de collaboration ont parfois été évités. L'interdépendance des tâches n'était pas assurée par le prototype ACVnum.

Par rapport à l'interdépendance des résultats⁵ : il n'existait pas d'interdépendance des résultats entre le groupe projet et le commanditaire. Cependant, une interdépendance des résultats existait entre les membres du groupe projet (au niveau de la notation du rapport d'ACV produit). Cela peut expliquer que certains groupes témoins ont eu un besoin de collaboration au niveau de groupe projet (besoin de davantage de collaboration via le logiciel openLCA).

Par rapport à la puissance du groupe⁶ : les groupes projets ont exprimé, dès le dé-

4. "L'interdépendance des tâches est le degré d'interaction entre les membres du groupe en fonction des tâches. Les membres du groupe peuvent travailler en parallèle, en ayant peu ou pas de contact les uns avec les autres, voire même en ne voyant pas leur travail combiné. Les groupes de recherche et développement fonctionnent parfois de cette manière, tout comme certains états-majors. Les membres du groupe peuvent également travailler en séquence, un membre effectuant une partie de la tâche et la transmettant à un autre membre. Les grandes organisations ont tendance à avoir des groupes qui fonctionnent de cette façon. Enfin, les membres du groupe peuvent être amenés à interagir fréquemment pour effectuer leur travail, comme c'est souvent le cas pour les groupes de travail, les groupes de réflexion ou les équipes de participation des employés." [Sbea and Guzzo, 1987, p.2]

5. L'interdépendance des résultats existe lorsque l'accomplissement d'une tâche par un groupe entraîne des conséquences qui sont importantes et partagées par certains ou tous les membres du groupe - par exemple, la rémunération, le temps libre et la reconnaissance. Les "résultats" sont accordés par des personnes autres que les membres du groupe, généralement un superviseur ou un cadre supérieur. Il peut s'agir de récompenses ou de punitions, d'un salaire, d'une promotion, d'une acquisition de compétences, d'une exposition ou d'une survie, et ils peuvent être distribués de diverses manières, par exemple de manière coopérative ou concurrentielle. Les résultats ne comprennent pas les avantages tirés de l'intérieur du groupe, comme l'interaction sociale. [Sbea and Guzzo, 1987, p.2]

6. La puissance est la conviction collective des membres du groupe que le groupe peut être efficace. Cette conviction dépend du sentiment des membres du groupe qu'ils ont ce dont ils ont besoin pour réussir - par exemple, une formation, des compétences, des membres talentueux, de l'argent, du temps, un accès aux membres clés de l'organisation et un retour d'information sur les performances du groupe.

part, un certain scepticisme sur l'intérêt de conduire l'ACV en relation étroite avec leur commanditaire. Ce scepticisme s'est manifesté par le fait que les groupes ont parlé à la place de leur commanditaire ("il n'a pas le temps", "il n'est pas intéressé", "il connaît déjà l'ACV, ça ne sert à rien", "il ne connaît pas l'ACV, ça ne sert à rien",...). Ce manque de croyance dans la puissance du groupe est un des résultats de notre étude. Que signifie cette absence de volonté de collaborer avec des organisations qui ont émis la volonté de réaliser une ACV préliminaire au sein de leur structure ? L'une des réponses possibles est le fait que les étudiants ne se sentaient pas à l'aise à mettre en place cette collaboration. Cela peut se confirmer par leur difficulté à acquérir un bon niveau dans la compétence normative (sera discuté dans la section 7.1.4).

Il se trouve que les étudiants se sont positionnés principalement aux niveaux 3 et 4 sur les compétences "Travail dans un groupe interdisciplinaire", "compétence normative". Cependant, la plupart des étudiants n'ont pas su détailler les méthodes et outils mis en place pour : travailler de manière collaborative, négocier avec leurs parties prenantes, se répartir des tâches de travail.

Conclusion paradoxale issue de l'interprétation 1

Il est apparu que les étudiants ont peu utilisé le prototype ACVnum en dehors de l'atelier de définition des enjeux de l'ACV. Cependant, des groupes Témoins ont exprimé un manque de possibilité à collaborer sur le logiciel d'ACV openLCA. Cette observation nous amène à conclure sur une situation paradoxale où un outil de collaboration aurait pu aider les groupes témoins et où l'outil de collaboration n'a pas été perçu comme une opportunité par les groupes ACVnum.

Cette situation paradoxale peut s'expliquer de plusieurs manières, par exemple : (1) les groupes n'avaient pas réellement besoin de collaborer (et donc le besoin exprimé par certains groupes témoins pour davantage de collaboration est en réalité la manifestation d'un autre besoin, pas encore défini); (2) un réel besoin de collaboration au sein des groupes projets avec un prototype ACVnum qui ne répond pas pleinement à ce besoin.

Interprétation 2 : des systèmes en conflit

Il semble qu'il y ait eu une confrontation entre deux "systèmes" : le groupe projet et le commanditaire. Ces deux systèmes sont intégrés dans un ensemble plus large, le groupe projet appartenant au système éducatif et le commanditaire appartenant au système non-académique (pourrait être appelée "monde-réel").

L'hypothèse peut être faite que les systèmes en jeu n'avaient pas les mêmes modes de communication et que cela a empêché la collaboration (hypothèse 4 dans la conclusion de cette section).

De plus, le conflit observé entre le système groupe projet et le système commanditaire pourrait venir d'un conflit plus profond entre le système éducatif et le système non-académique (hérités par les sous-systèmes). Cette thèse n'ayant pas vocation à travailler sur les conflits entre le système éducatif et le système non-académique, il est difficile d'aller plus loin dans l'analyse.

La puissance tend à être étroitement liée à la performance; si le groupe a reçu un retour positif sur sa performance jusqu'à présent, il tend à croire qu'il peut être efficace à l'avenir. En outre, l'interdépendance des tâches donne aux membres davantage d'occasions de voir et donc d'évaluer les compétences des autres. L'inverse est également vrai : les changements dans le sentiment de puissance du groupe affectent la façon dont les membres du groupe organisent leur interdépendance des tâches. [Sbea and Guzzo, 1987, p.2]

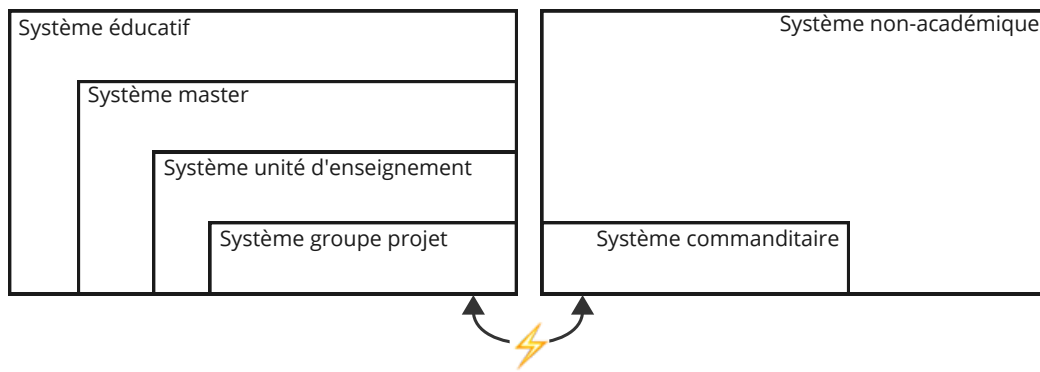


FIGURE 7.2 – Représentation des systèmes en jeu dans l'expérimentation 1 et les conflits visibles

Deux systèmes sont distincts : le système éducatif et le système non académique. Le premier système comprend le sous-système master (composé des unités d'enseignement, de l'équipe pédagogique, des étudiants par exemple), le système d'unité d'enseignement sur l'ACV et le système projet. L'éclair illustre la tension observée entre les systèmes "groupe projet" et "commanditaire".

Conclusion sur le cadre théorique : Les étudiants ont eu des difficultés à comprendre dans quelle mesure leur contexte d'application était spécifique. Ils ont eu des difficultés à rentrer en interaction avec un autre système (système commanditaire).

Conclusion sur les artefacts numériques : Les caractéristiques suivantes ont été retrouvées comme nécessaires dans les expérimentations :

- (a) système convivial ;
- (b) système collaboratif (au sein d'un même système) ;
- (c) système pour l'apprentissage.

La caractéristique "système modifiable" pour être adaptée à un milieu n'a pas été réellement testée car aucun acteur n'a modifié le prototype ACVnum mis en oeuvre. De plus, la caractéristique autour de la collaboration n'a pas été validée entre plusieurs systèmes.

Gap : Cette section a permis de comprendre pourquoi les parties prenantes des expérimentations ont eu des difficultés à collaborer lors des démarches d'ACV mises en oeuvre dans les expérimentations (notamment l'expérimentation 1). Plusieurs hypothèses ont été mises en évidence dans la discussion pour expliquer ce manque de capacité à penser la collaboration, notamment :

- Hypothèse 1 : La démarche ACV et les logiciels d'ACV sont des freins à la collaboration (freins issus des barrières techniques et non-techniques inhérents à la démarche et aux logiciels d'ACV) ;
- Hypothèse 2 : Le contexte pédagogique local est un frein à la collaboration (autre cours du master en décalage avec les objectifs du cours d'ACV, manière d'introduire le prototype ACVnum, présentation de la démarche collaborative) ;
- Hypothèse 3 : Le manque de collaboration vient entièrement du type d'interaction proposé à travers le prototype ACVnum, ne correspondant pas aux besoins des utilisateurs ;
- Hypothèse 4 : La différence de culture entre le système éducatif et le système non-académique était trop grande pour que les étudiants et les commanditaires soient capables de communiquer et de se comprendre, limitant ainsi la collaboration et la volonté à collaborer.

Il s'agit dans la section suivante de relier les résultats obtenus au cadre de la permaingénierie proposé.

7.1.4 Caractéristique 4 : expertise interactionnelle et compétences d'ingénierie pour la soutenabilité

Cette section permet de comparer nos résultats avec l'état de l'art, au niveau des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité. La première section est focalisée sur la compétence normative, compétence qui a été difficile à acquérir pour les étudiants. La

deuxième section est centrée sur les relations entre les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité. La troisième section aborde la compétence interactionnelle.

Compétence normative en jeu dans la collaboration

La difficulté de la collaboration peut être mise en lien avec l'analyse sur les compétences. Le manque de compétence normative a été un point délicat dans la collaboration entre les groupes projets et leur commanditaire. Les étudiants ont eu des difficultés à comprendre et négocier les valeurs, normes, objectifs de leurs commanditaires. Ce manque a mis certains groupes en difficulté car ils sont rentrés en conflit avec leur commanditaire, au lieu d'être en négociation. Des remarques telles que "ils s'en fichent de l'ACV" ont été formulées (sans réelle preuve des étudiants d'un désintérêt de leur commanditaire pour l'ACV). Certains groupes auraient pu montrer en quoi l'ACV est un cheval de Troie pour amorcer une stratégie de transition écologique dans une organisation [Reyes et al., 2009]. Ainsi, les moments d'échanges entre les groupes projets et les commanditaires pouvaient être source de tensions, empêchant une réelle collaboration.

Il a été vu dans la section 7.1.1 que l'épistémologie des étudiants en ingénierie pouvait être plus positiviste et que les étudiants, dans leurs propos, rejetaient en partie cette épistémologie. Cependant, elle semble être très présente dans leurs pratiques. L'ensemble des groupes ont demandé si leur unité fonctionnelle était correcte, sans l'avoir construite avec leur commanditaire. Une réponse binaire de l'ordre du vrai/faux était demandée alors qu'une unité fonctionnelle doit décrire une fonction par rapport à un besoin exprimé par le commanditaire. Cette situation est proche de celle décrite par [Cruz et al., 2021] où certains étudiants attendaient des réponses binaires de la part de leurs professeurs, sans penser que la connaissance pouvait venir d'une co-construction entre des acteurs.

Ainsi, il semble difficile pour les étudiants d'acquérir une compétence normative si une épistémologie non-positiviste n'est pas assimilée (pas seulement dans la pensée mais dans la pratique).

Liens entre les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité

Les compétences ont été étudiées de manières unitaires. Cependant, des liens entre les compétences ont été relevés par les personnes observées. Ces liens sont représentés sous forme de diagramme dans la figure 7.3. Il semble que quatre compétences (connaissance de soi, esprit critique, pensée systémique, contextualisation et vision du futur) soient particulièrement utilisées pour les réflexions avant le passage de l'action (catégorie nommée planification). La compétence normative n'est pas une compétence clé (car comme le rappelle [Redman and Wiek, 2021] toutes les compétences sont importantes) mais plutôt une compétence pivot permettant aux acteurs de se comprendre et d'entrer en négociation vis-à-vis des actions à mener. Trois compétences sont plutôt liées à l'implémentation des actions (résoudre des problèmes, compétence stratégique, travail dans un groupe interdisciplinaire).

Cette représentation peut être rapprochée des conclusions de [Redman and Wiek, 2021] (la figure résumant leurs travaux correspond à la figure 7.4). En effet, [Redman and Wiek, 2021] ont repris les 8 compétences pour la soutenabilité les plus citées dans la littérature. Celles-ci sont proches des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité (quasiment identiques étant donné que [Quelhas et al., 2019] et [Redman and Wiek, 2021]

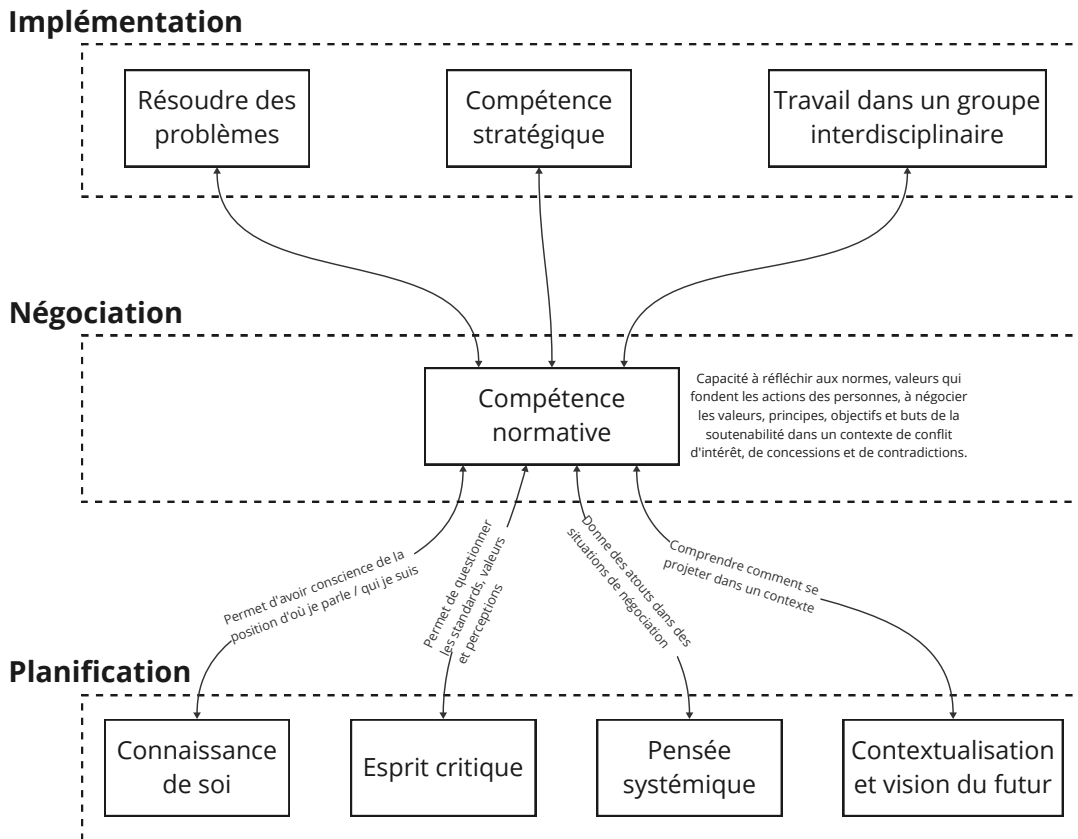


FIGURE 7.3 – Liens entre les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité observés lors des expérimentations

La figure structure les compétences en 3 blocs. Le premier bloc (en bas de la figure) est le bloc "Planification" composé des compétences suivantes : connaissance de soi, esprit critique, pensée systémique, contextualisation et vision du futur. Le bloc "Négociation" est composé de la compétence normative uniquement. La définition de cette compétence est indiquée à sa droite. Le troisième bloc est le bloc "Implémentation" composée des compétences suivantes : résoudre des problèmes, compétence stratégique, travail dans un groupe interdisciplinaire. Ainsi, la figure représente le fait que le passage de la planification à l'implémentation peut être bloqué par la compétence normative si celle-ci n'est pas maîtrisée.

ont travaillé à partir de la même littérature ([Wiek et al., 2011] notamment). La seule différence majeure est le fait que [Quelhas et al., 2019] positionne la compétence "Esprit Critique" comme une compétence d'ingénierie pour la soutenabilité, alors que dans le cadre de [Redman and Wiek, 2021], cette compétence est dans la rubrique "compétences générales" hors du cadre des compétences clés pour la soutenabilité.

[Redman and Wiek, 2021] définit, grâce à une revue systématique de la littérature, que les compétences pour porter des transformations soutenables de la société sont au nombre de cinq, avec 4 compétences pour la planification des transformations (pensée systémique, vision du futur, compétence normative, compétence stratégique), 1 compétence pour l'implémentation (proche de la compétence "résoudre des problèmes") et 2 compétences professionnelles (inter et intra personnel). Les auteurs affirment que ces compétences doivent être réalisées dans un esprit de collaboration et d'entraide ("self-caring ways", p.5).

Cette représentation des compétences de [Redman and Wiek, 2021] s'inscrit dans un cadre plus large que l'ingénierie. Cette représentation a donc été reprise et adaptée aux éléments dont nous disposons, en figure 7.5.

Expertise interactionnelle

Pour rappel, une expertise interactionnelle dans un domaine est la capacité à se fondre parmi les experts du domaine en question, sans forcément être un praticien du domaine. "Pour acquérir une expertise interactionnelle, les étudiants doivent obtenir une compréhension approfondie et linguistiquement communicable des concepts, conventions, styles cognitifs et connaissances tacites qui permettent à ces disciplines de fonctionner collectivement." [Seager et al., 2012, p.480].

Dans les expérimentations menées, une expertise interactionnelle aurait pu être développée au niveau des systèmes industriels du commanditaire si des interactions récurrentes avaient eu lieu (ce qui n'était pas le cas). Ainsi, il n'est pas possible de conclure sur cet aspect du cadre théorique. Pour cela, les expérimentations doivent être conduites sur une plus longue durée et avec davantage de collaboration entre les parties prenantes.

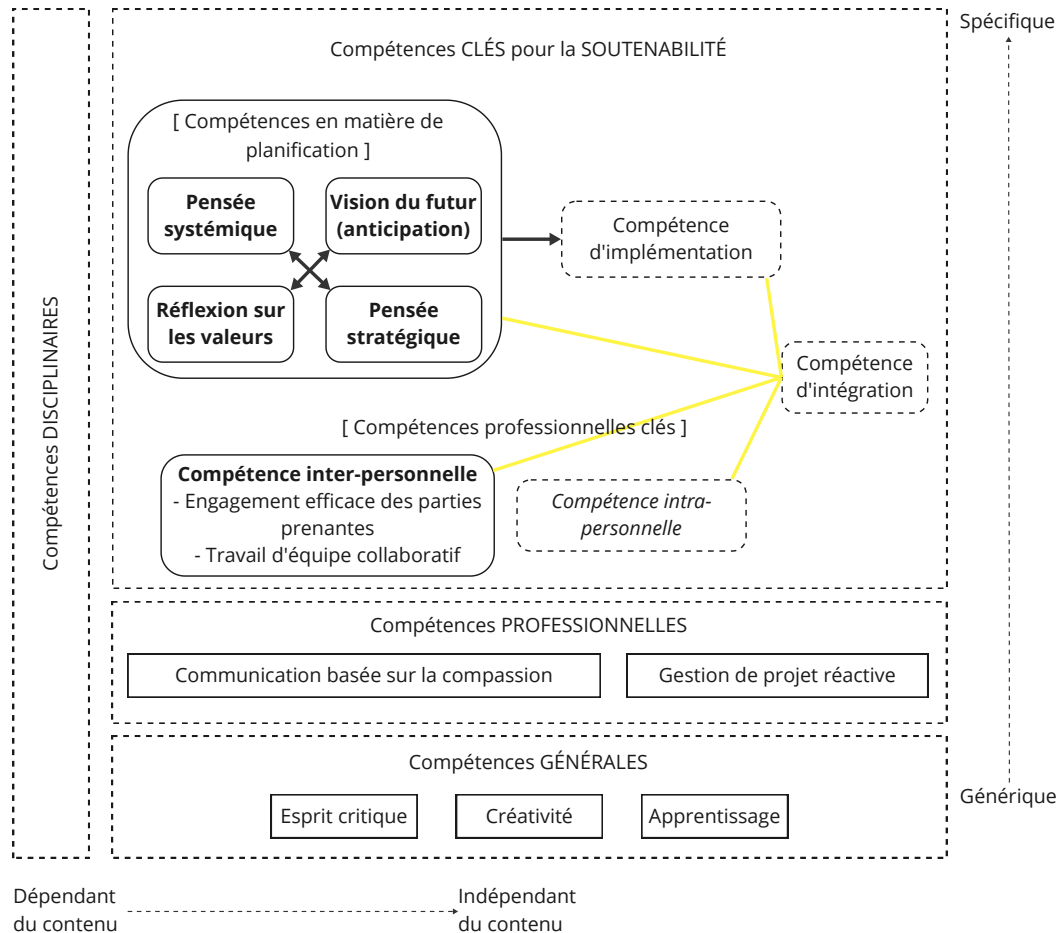


FIGURE 7.4 – Cadre des compétences pour porter des transformations soutenables dans la société, reproduit et traduit de [Redman and Wiek, 2021]

La figure est composée de quatre blocs de compétences, placées en fonction de deux axes. Sur l'axe des ordonnées, les compétences sont placées en fonction de leur côté générique (utilisées dans différents domaines) ou spécifique (spécifique aux avancées dans le domaine de l'ingénierie soutenable). Sur l'axe des abscisses, les compétences sont positionnées en fonction du fait qu'elles sont dépendantes du contenu.

Le bloc "compétences disciplinaires" regroupe l'ensemble des expertises disciplinaires requises pour adresser les enjeux écologiques (exemple : compétence sur les questions énergétiques).

Le bloc "compétences générales" regroupe les compétences transversales aux disciplines. Trois compétences sont jugées comme particulièrement importantes : esprit critique, créativité et capacité d'apprentissage.

Le bloc "compétences professionnelles" sont liées à la compétence inter-personnelle. Ce bloc est composé de deux compétences : communication basée sur la compassion, gestion de projet réactive.

Le bloc "compétences clés pour la soutenabilité" comprend 5 compétences établies en gras et 3 compétences émergentes. Les compétences établies sont : pensée systémique, vision du futur (anticipation), réflexion sur les valeurs, pensée stratégique, compétence inter-personnelle. Les compétences émergentes sont : compétence d'implémentation, compétence d'intégration et compétence intra-personnelle. Parmi les compétences clés pour la soutenabilité, les compétences inter et intra personnelles sont considérées comme des compétences professionnelles clés, liées aux profession du *care*.

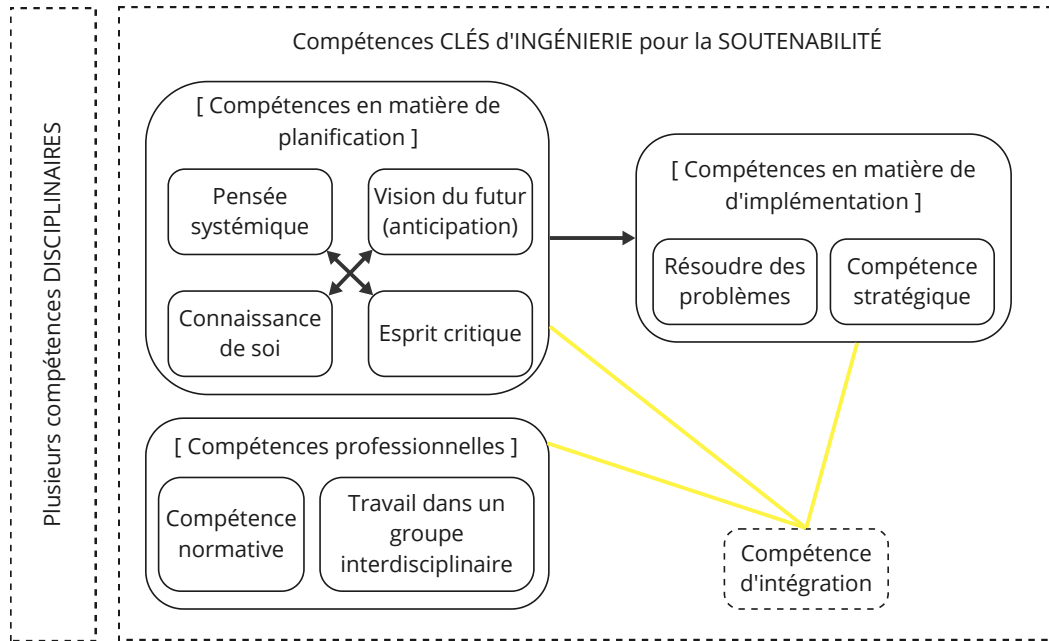


FIGURE 7.5 – Schéma général représentant les compétences disciplinaires et les compétences clés d'ingénierie pour la soutenabilité

La figure représente la conclusion de mes travaux sur les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité. Ces compétences sont représentées en trois blocs : les compétences en matière de planification, les compétences professionnelles et les compétences en matière d'implémentation. L'ensemble de ces blocs permettent l'intégration de transitions soutenables dans les territoires. Il est à noter que la compétence normative est une compétence pivot dans le sens où un manque de maîtrise de cette compétence peut mettre en péril le projet de transition. Le bloc "plusieurs compétences disciplinaires" montre que plusieurs blocs disciplinaires doivent être maîtrisés pour être des supports à la compétence interactionnelle.

Conclusion sur le cadre théorique : Les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité sont liées les unes aux autres et doivent être pensées comme un ensemble cohérent (et non de manière unitaire). Ces compétences sont stabilisées dans la littérature scientifique.

La collaboration et le *care* sont transversales aux compétences. Ainsi, la collaboration et le *care* ne sont pas au niveau des compétences mais correspondent au cadre général dans lequel ces compétences doivent être mises en oeuvre.

Conclusion sur les artefacts numériques : Les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité ont été développées en partie grâce à la démarche ACV. Cependant, les interactions vécues via les logiciels en jeu ont peu participé à cette montée en compétence.

La démarche d'ACV est une démarche nécessitant une expertise interactionnelle. Les outils logiciels d'ACV (openLCA et ACVnum) n'ont pas été un support pour la mise en oeuvre de ces expertises.

Gap : Par rapport à la mobilisation des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité, il s'avère que le manque de maîtrise de la compétence normative a rendu difficile le travail des étudiants par rapport à leur commanditaire, ne sachant pas faire face à des situations de contradictions ou de conflits. Cela a empêché certains groupes de développer des compétences en lien avec l'implémentation de propositions pour une transition soutenable des organisations impliquées dans les démarches ACV. Il semble que le manque de compétence normative a mis en échec la capacité des groupes projets à penser des actions pour la soutenabilité (dans le cadre de l'organisation de leur commanditaire). C'est la raison pour laquelle, je pose l'hypothèse que **la compétence normative peut bloquer le développement des autres compétences lorsqu'elle n'est pas acquise et ainsi bloquer l'action pour la soutenabilité.**

Des expérimentations différentes doivent être réalisées pour étudier l'expertise interactionnelle.

7.2 Résumé des discussions

Des écarts ont pu être observés entre le cadre de la permaingénierie et les situations d'expérimentation. Ces écarts viennent plutôt des observations liées aux pratiques des parties prenantes. Il est important de noter qu'un besoin proche du cadre de la permaingénierie a été exprimé par l'ensemble des parties prenantes. Cependant, la mise en oeuvre de ce cadre par rapport aux interactions humains - machines n'est pas forcément cohérente. Une mise à jour du cadre est proposée au niveau de l'interaction que doit médiatiser l'outil. Ainsi, ce ne sont plus des caractéristiques des artefacts numériques qui sont indiqués mais des caractéristiques de l'interaction humain - technologie (qui peuvent être implémentées différemment selon les systèmes techniques en jeu).

La proposition modifiée est la suivante :

1. Éthique du *care*
 - (a) Une interaction favorisant une épistémologie constructiviste (exemple : rappeler que certaines parties doivent être co-construites, par exemple la réalisation de l'unité fonctionnelle dans le cas de l'ACV)

- (b) Une interaction favorisant une collaboration bienveillante entre les parties prenantes
- 2. Objectif de soutenabilité forte
 - (a) Une interaction qui ne bloque pas l'action des parties prenantes (cette caractéristique est en tension avec le principe de précaution)
 - (b) Une interaction qui questionne les parties prenantes sur l'objectif de l'action menée
- 3. Approche des problèmes d'ingénierie pour la soutenabilité
 - (a) Une interaction qui porte une vision socio-technique des problèmes d'ingénierie
 - (b) Une interaction qui peut être modifiée selon le *milieu* c'est-à-dire que l'interaction peut différer selon l'usage en fonction des besoins des acteurs
 - (c) Une interaction conviviale
 - (d) Une interaction permettant une montée en compétence des parties prenantes du projet d'ingénierie
- 4. Expertise interactionnelle et compétences d'ingénierie pour la soutenabilité
 - (a) Une interaction qui met en oeuvre des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité
 - (b) Une interaction permettant une collaboration entre les parties prenantes d'un projet d'ingénierie
 - (c) Une interaction permettant la collaboration de plusieurs types d'expertises

Ainsi, il semble que dans la permaingénierie, la place des sciences sociales soit forte. Si l'on reprend les 4 facettes de l'ingénierie décrites par [Dias de Figueiredo, 2014], il serait possible de dire que les sciences sociales devraient avoir une place de premier ordre dans les formations d'ingénierie, afin d'assurer aux ingénieurs une capacité à communiquer ou négocier avec leurs parties prenantes. La figure 7.6 représente cette hiérarchie.

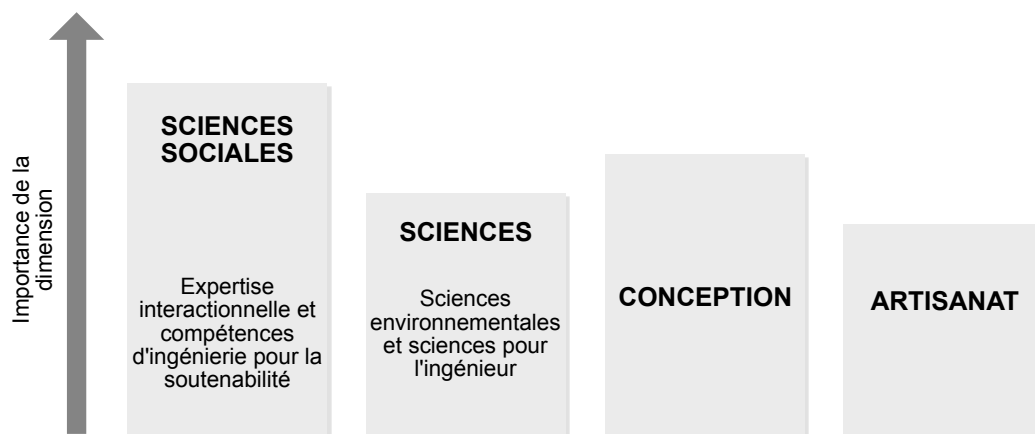


FIGURE 7.6 – Représentation des facettes / dimensions de la permaingénierie

Les 4 dimensions de l'ingénierie définies par [Dias de Figueiredo, 2014] sont reprises et alignées. Chaque dimension a une taille définissant son importance dans la permaingénierie.

Il est à noter que la dimension "science" ne devrait pas être uniquement centrée sur les sciences de l'ingénierie mais également sur les sciences environnementales.

7.3 Limites des expérimentations

Cette section est dédiée à la présentation des biais liés aux expérimentations présentées dans le chapitre 5. Cela permet d'identifier les limites issues des expérimentations.

7.3.1 Conception du prototype

Le prototype ACVnum a été testé dans les deux expérimentations. Il a été utilisé par une population hétérogène dans deux contextes différents. Il s'agit dans cette section de présenter les limites liées à la conception du prototype ACVnum. La section est divisée en deux sous-parties, chacune dédiée à une expérimentation.

Le prototype ACVnum a été construit en amont des expérimentations à partir des présupposés que la démarche ACV pourrait être rendue plus collaborative en l'intégrant sur un tableau collaboratif en ligne.

Expérimentation 1

Le prototype ACVnum a été réalisé sur un tableau collaboratif nommé "Miro". Les étudiants participant à l'expérimentation avaient eu une expérience négative de l'usage de Miro dans un autre cours quelques semaines avant l'intégration du prototype ACVnum dans le cours d'ACV. Les étudiants étaient crispés par le fait de devoir réutiliser Miro, suite à cette mauvaise expérience. Par conséquent, certains groupes ACVnum ont mal accueilli le fait de devoir utiliser Miro. Un groupe ACVnum a notamment refusé de l'utiliser dans un premier temps, pour finalement accepter. Cela a amené à une situation de tension et pourrait expliquer le fait que certains groupes ACVnum se sont peu appropriés le prototype lors des trois mois d'usage. Ce n'est qu'une fois que les étudiants ont utilisé le prototype avec leur partie prenante et ont vu que cela pouvait être un support à l'échange que le prototype a été plus largement utilisé.

Ainsi le choix de Miro comme support numérique au prototype a ralenti voire parfois empêché l'appropriation du prototype ACVnum.

Expérimentation 2

Le prototype ACVnum a été conçu en amont de l'expérimentation. Ainsi, il aurait pu être conçu avec les habitants afin d'assurer une cohérence entre la conception et la pratique. Le choix de la plateforme n'a pas été fait avec les membres du *focus group*. La difficulté de manipulation de l'outil a été un frein à son usage pour certains membres, pour des raisons d'usage de l'interface (problématiques pour parcourir l'outil avec un trackpad par exemple).

7.3.2 Design des expérimentations

Expérimentation 1 : un contexte de permaingénierie ?

Afin de définir si la classe d'étudiants était en ligne avec les principes de la permaingénierie, seulement deux questions ont été posées⁷ :

7. voir section 4.2.2 pour la description des résultats

- Question 1 : Quelle est la place de l'écologie dans votre vie personnelle et professionnelle ?
- Question 2 : Pensez-vous que la technologie va permettre de résoudre les problématiques écologiques ? Pourquoi ? Quelle est pour vous la place de l'ingénieur dans cette transition écologique ?

Est-ce que ces deux questions suffisent à définir un contexte de permaingénierie se positionnant dans les sciences de l'ingénierie pour la soutenabilité ? Bien entendu, cela peut être réducteur et une analyse plus poussée des croyances des étudiants de la classe aurait pu être réalisée pour définir ce contexte plus précisément, à travers des entretiens.

Analyse des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité

Les compétences pour la soutenabilité, en particulier celles qui touchent à l'ingénierie, font l'objet d'un consensus croissant au sein de la communauté scientifique. Cependant, les méthodes pour évaluer ces compétences restent peu étudiées. [Redman et al., 2021] ont réalisé la première revue de littérature systématique des méthodes d'évaluation des compétences pour la soutenabilité et leur étude porte uniquement sur les systèmes d'évaluation mobilisant le cadre conceptuel de [Wiek et al., 2011]. Les méthodes ont été structurées en 8 types de méthodes : (1) grille d'auto-évaluation, (2) écriture réflexive, (3) scénario/test de cas, (4) *focus group*/entretiens, (5) observations de la performance, (6) cartographie conceptuelle, (7) test conventionnel, (8) travail pédagogique régulier. La méthode d'auto-évaluation est celle la plus représentée dans la littérature scientifique. C'est également celle qui a été choisie dans notre étude. Cette section va détailler les forces, faiblesses et potentielles améliorations de la méthode d'auto-évaluation.

Les expérimentations 1 et 2 ont été construites de manière complémentaire. Elles ont été conduites en parallèle, avec l'expérimentation 1 conduite d'octobre 2021 à janvier 2022 et l'expérimentation 2 d'août 2021 à mars 2022. Bien que des grilles d'auto-évaluation aient été utilisées dans les deux expérimentations, la manière de remplir la grille n'a pas été la même et l'objectif de la grille n'était pas le même. En effet, les données qualitatives récoltées grâce aux questionnaires dans l'expérimentation 1 ont mis en évidence que les étudiants ne répondaient pas forcément au questionnaire en fonction de l'ACV uniquement. Ainsi, dans l'expérimentation 2, la grille d'auto-évaluation a été gardée mais elle a été remplie pendant les entretiens (en ligne ou en présentiel). Cette nouvelle procédure de récolte de données a pris plus de temps. Ainsi, le traitement a été plus long car les réponses étaient plus fournies (beaucoup d'étudiants ont indiqué leur niveau de compétence sans donner d'exemple pour prouver leur niveau). De plus, lorsque les membres du *focus group* ont parlé d'autres éléments que l'analyse de cycle de vie, j'ai pu recadrer la réponse sur la démarche ACV. Les questionnaires réalisés dans l'expérimentation 2 n'avaient pas pour objectif de réaliser des tests statistiques mais plutôt de comprendre comment les habitants mobilisaient chacune des compétences, dans leur quotidien et dans la pratique de l'ACV.

Dans la suite de la section, j'évoque uniquement l'usage de la grille d'auto-évaluation dans la cadre de l'expérimentation 1.

La méthode d'auto-évaluation comporte 6 forces (d'après [Redman et al., 2021]) :

1. Facile à mettre en place, analyser et mettre à l'échelle peu importe l'échantillon ;

2. Peut être intégré avec d'autres types de récolte de données basés sur des questionnaires / enquêtes ;
3. Outil efficace pour l'évaluation et cette pratique améliore la conscience de soi des élèves ;
4. Prendre ses propres précautions et interpréter les résultats comme "ce que les élèves pensent d'eux-mêmes" ;
5. Tester statistiquement les constructions avec des échantillons appropriés ;
6. Construire des modèles psychométriques qui relient solidement les compétences à l'outil.

La facilité de mise en place a été confirmée lors de notre étude (10 minutes par questionnaire, 3 questionnaires dans l'année). Cette grille a été pu être complétée par d'autres méthodes de récolte de données, davantage centrées sur des entretiens groupés. Les résultats obtenus ne peuvent pas être interprétés comme des niveaux "absolus" mais sont bien des niveaux interprétés par les étudiants par rapport à eux-mêmes. La taille de l'échantillon est une limite de l'étude étant donné que c'est un échantillon relativement petit (38 étudiants). Il mériterait d'être complété par d'autres études similaires pour obtenir un échantillon davantage conséquent.

La méthode d'auto-évaluation comporte 4 faiblesses (d'après [Redman et al., 2021]) :

1. Les résultats sont basés sur la manière inconnue dont chaque élève interprète (de manière incohérente) la question, l'échelle ou comprend la compétence ;
2. On ne peut pas supposer que la distance entre les éléments d'une échelle est linéaire ;
3. Il est peu probable que les élèves aient la capacité d'évaluer leur propre capacité dans une activité qu'ils n'ont jamais pratiquée ;
4. Peu d'harmonisation avec des outils plus objectifs.

Afin de pallier la première faiblesse, les niveaux donnés par compétences n'étaient pas des chiffres (niveau 0, 1, 2,..., 5) mais des phrases "Je peux parler de cette compétence", "Je ne peux pas en parler", "Je maîtrise une méthode pour mettre en oeuvre cette compétence", "J'ai déjà pratiqué cette compétence une fois". L'écart entre chaque niveau de la grille était progressif afin d'éviter d'avoir des étudiants qui se positionnent entre deux niveaux. Cette grille de niveau était tirée d'une grille de l'éducation nationale et était donc assez aisée à comprendre pour les étudiants. Un exemple était donné pour chaque compétence afin d'assurer leur compréhension de la compétence. Une limite évidente à cette technique est celle qui critique la capacité des étudiants à s'auto-évaluer (faiblesse 3). Cette limite est particulièrement forte lorsque l'on se positionne dans une logique positiviste, ce qui n'est pas le cas dans cette thèse. De manière générale, il est important de se demander si une étude quantitative est pertinente pour ce genre d'analyse. Le positionnement par rapport au questionnaire a été fait par les étudiants et il peut y avoir un décalage entre la perception de l'étudiant et la perception de l'enseignant. Nous avons fait le choix de ne pas "vérifier" les réponses en analysant les rendus individuels et collectifs des étudiants. En effet, nous avons fait le choix de considérer que la perception des étudiants est la "bonne" (leur perception) dans le sens où c'est leur vérité. Le fait que les questionnaires étaient anonymes a permis aux étudiants d'exprimer leur point de vue (de manière parfois très dure) en toute liberté.

En ce qui concerne la méthode de grille d'auto-évaluation, 6 améliorations sont proposées par [Redman et al., 2021] :

1. Utiliser ou s'appuyer sur les échelles existantes ;
2. Se concentrer sur les aspects qui sont abordés dans l'unité d'apprentissage ;
3. Rendre aussi concret que possible avec un nombre suffisant d'énoncés par compétence ;
4. Prendre ses propres précautions et interpréter les résultats comme "ce que les élèves pensent d'eux-mêmes" ;
5. Tester statistiquement les constructions avec des échantillons appropriés ;
6. Construire des modèles psychométriques qui relient solidement les compétences à l'outil.

Afin d'améliorer la méthode d'auto-évaluation, une focalisation explicite sur certains aspects de l'unité d'apprentissage aurait pu être réalisée. Cela aurait permis des réponses plus ciblées sur la méthode d'ACV et l'usage des outils logiciels d'ACV. Un autre élément d'amélioration est la construction d'un échantillon plus conséquent.

Concernant le traitement des données, le codage a été réalisé de manière itérative par une seule personne et aurait pu être doublé par un autre chercheur pour consolider les analyses.

Conclusion

Je me rapproche de deux pas, elle s'éloigne de deux pas. Je chemine de dix pas et l'horizon s'enfuit de dix pas plus loin. Pour autant que je chemine, jamais je ne l'atteindrai. A quoi sert l'utopie ? Elle sert à cela : cheminer.

[Galeano, 1993]

Cette conclusion rappelle le contexte de la thèse, les questions de recherche ainsi que les réponses associées, les contributions et enfin les perspectives d'application et de recherche ouvertes grâce aux travaux réalisés.

8.1 Contexte et enjeux

La Terre devient progressivement inhabitable à cause de la pression des activités humaines sur le système Terre : changement climatique, dérèglement des cycles biogéochimiques, chute de la biodiversité, occupation des sols, etc. Des dynamiques de transitions vers un changement culturel des sociétés, notamment occidentales, semblent être cruciales pour limiter le dépassement des limites planétaires. Mes travaux de recherche ont pour objectif de mieux comprendre comment il est possible de déclencher et d'accompagner des transitions soutenables des systèmes socio-techniques.

L'ingénierie, activité multi-facette, évoluant en fonction des contextes historiques, politiques et sociaux, semble être un levier d'action pour impulser cette transition. L'ingénierie est une activité de conception et de production de systèmes techniques. Les liens entre ingénierie et soutenabilité ont été étudiés dans la littérature scientifique. L'ingénierie est une activité médiatrice entre les systèmes naturels et les systèmes sociaux. Le paysage de l'ingénierie pour la soutenabilité a été défini comme un paysage large, allant d'une compréhension faible à une compréhension forte de la soutenabilité. De nombreuses formes d'ingénierie ont des définitions relativement larges, pouvant être comprises à la fois dans un paradigme de soutenabilité faible comme dans un paradigme de soutenabilité forte. Cependant, les formes d'ingénieries placées plutôt du côté de la soutenabilité sont moins nombreuses et peu étudiées. C'est la raison pour laquelle j'ai décidé d'explorer ce à quoi

pourrait ressembler une ingénierie dans un contexte de transition écologique, avec une conception forte de la soutenabilité.

Les ingénieurs du XXI^e siècle manipulent des artefacts numériques dans leurs pratiques. Les artefacts sont des objets intermédiaires, c'est-à-dire qu'ils véhiculent des informations entre les acteurs, des valeurs et conditionnent l'action. C'est la raison pour laquelle j'ai choisi d'aborder la question de l'ingénierie pour la soutenabilité à travers les artefacts numériques et les interactions humains-machines. Cela permet de comprendre comment l'ingénieur peut avoir des interactions avec le monde qui l'entoure en cohérence avec ses valeurs. L'hypothèse sous-jacente est qu'il est possible d'adresser les questions de transition soutenable des systèmes socio-techniques à travers l'analyse des interactions humains-technologies, notamment sur les technologies numériques.

Ainsi, l'objectif de ma thèse est le suivant : *Proposer un cadre théorique pour comprendre comment des activités d'ingénierie peuvent exister dans des contextes de soutenabilité forte et explorer les artefacts numériques qui peuvent être déployés en support aux activités d'ingénierie dans ces contextes.*

8.2 Questions de recherche et réponses

Dans cette thèse, je propose le cadre théorique et pratique de la permaingénierie, un type d'ingénierie qui s'inscrit dans un paradigme de soutenabilité forte. L'éthique, l'objectif, la démarche et l'expertise des acteurs de la permaingénierie ont été définis et sont nommés caractéristiques tout au long du manuscrit. La description de ces caractéristiques a été faite au niveau conceptuel (théorique) et au niveau des implications pour les artefacts numériques de l'ingénierie (pratique).

Deux questions de recherche ont été définies, chacune à différents niveaux d'analyse. La première question de recherche porte sur un niveau conceptuel, tandis que la deuxième question de recherche est à un niveau expérimental. Les niveaux des questions de recherche étant différents, les données issues des expérimentations pour répondre à ces questions le sont également.

La méthodologie Value Sensitive Design a été mise en oeuvre afin de structurer deux expérimentations. Des investigations conceptuelles, empiriques et techniques ont permis de faire émerger les valeurs, pratiques et compétences des parties prenantes des expérimentations. Dans ces deux expérimentations, un prototype ACVnum médiatisant les caractéristiques de la permaingénierie a été utilisé. Les utilisateurs de ce prototype ont été observés en situation d'usage. Des données quantitatives et qualitatives sur les valeurs, pratiques et compétences des acteurs en situation de conception ont été récoltées et ont permis de répondre aux deux questions de recherche présentées dans la suite de cette section.

La suite de cette section est un rappel des questions de recherche et des résultats obtenus dans les expérimentations.

QR 1 : Dans un contexte de transition écologique, dans quelle mesure l'ingénierie peut évoluer vers d'autres manières d'être et d'être pratiquée ?

Suite au travail effectué dans cette thèse, il est possible d'affirmer que l'ingénierie peut évoluer vers d'autres manières d'être et d'être pratiquée sous pression d'une nécessaire

transition écologique.

Dans le cadre d'investigations conceptuelles, plusieurs types d'ingénierie ont été définis et placés sur une échelle en fonction de leur cadre d'activité. Un manque d'études quant aux pratiques d'ingénierie dans un contexte de soutenabilité forte a été identifié. C'est la raison pour laquelle j'ai proposé une ingénierie dans le cadre d'un contexte de soutenabilité forte. Quatre caractéristiques de la permaingénierie ont été définis :

- Éthique : une éthique du *care* ;
- Objectif : agir pour une transition écologique comprise comme un changement culturel majeur pour les sociétés occidentales ;
- Démarche : approche socio-technique des problèmes d'ingénierie ;
- Expertise et compétences : expertise interactionnelle et compétences d'ingénierie pour la soutenabilité.

La collaboration est transversale à ce cadre car elle se retrouve dans l'ensemble des caractéristiques comme un facteur clé de réussite.

Le besoin d'un cadre général autour de l'ingénierie dans un contexte de soutenabilité forte s'est fait prégnant dans les deux expérimentations, notamment dans le discours des parties prenantes des expérimentations. Cependant, la mise en oeuvre de cette ingénierie dans un contexte de soutenabilité forte a été difficile pour les acteurs. Cet écart entre le discours et la pratique est une des principales conclusions de cette thèse : il existe un besoin d'un cadre conceptuel afin de commencer à construire des outils et méthodes spécifiques à cette pratique. **La permaingénierie ressort des expérimentations comme un cadre possible à explorer.**

QR 2 : Est-ce que le numérique a une place dans la transition écologique ? Quels sont les outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ?

Cette deuxième question de recherche porte plutôt sur les outils pour la pratique de la permaingénierie et en particulier le rôle des interactions entre les acteurs et les artefacts numériques.

Est-ce que le numérique a une place dans la transition écologique ? Dans l'état actuel des choses, il n'est pas possible d'affirmer que les artefacts numériques sont compatibles avec la transition écologique. Même, les effets directs, capacitants et structurants des artefacts numériques sont néfastes à la transition écologique. Cependant, certains éléments d'une culture numérique comme la participation, la remédiation et le bricolage sont compatibles avec la transition écologique (chapite 3).

Quels sont les outils et méthodes numériques permettant d'accompagner les pratiques d'ingénierie en cohérence avec la transition écologique ? Il a été fait le choix de tester une méthode d'ingénierie pour la soutenabilité : l'analyse de cycle de vie. Cette méthode est supportée par des outils numériques. Étant donné que les artefacts numériques supports à l'ACV n'ont pas de caractéristiques proches de celles de la permaingénierie, il a été choisi de réaliser un prototype de logiciel d'ACV plus proche de la permaingénierie. Ce prototype a été nommé ACVnum. Ainsi, une médiatisation de la méthode ACV dans un outil numérique se voulant collaboratif a été proposée.

Les expérimentations menées ont pu mettre en évidence le fait que la conception d'artefacts numériques plus proche des principes de permaingénierie n'est pas suffisant. En effet, même si le prototype ACVnum est plus proche des principes de permaingénierie que les logiciels d'ACV classiques, un écart a été observé entre les attentes et valeurs des utilisateurs et les valeurs embarquées dans le prototype ainsi que les actions possibles par son usage. Cependant, il est important de noter qu'il n'a pas été montré que la démarche d'ACV et l'usage d'un artefact numérique support à la démarche ACV empêche les acteurs d'agir pour la transition écologique.

De plus, l'impact "positif" de la démarche d'ACV sur les acteurs au niveau de leur compréhension des enjeux écologiques n'a pas été clairement observée. L'augmentation des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité des étudiants peut venir de la démarche ACV comme de l'usage d'autres méthodes (MFA, RSE, écologie industrielle et territoriale) apprises au cours de la même période.

Les caractéristiques des artefacts numériques pour la permaingénierie n'ont pas toutes été validées. De plus, il ne semble pas pertinent de réaliser une liste des caractéristiques des artefacts étant donné que cette liste varie en fonction des artefacts et des situations. Cependant, des caractéristiques des interactions entre le permaingénieur et ses artefacts semblent pouvoir être identifiées. La liste ci-dessous n'est ni prescriptive ni exhaustive, mais permet d'avoir un cadre général à consolider / continuer à tester. Le cadre est le suivant :

1. Éthique du care
 - (a) Une interaction favorisant une épistémologie constructiviste
 - (b) Une interaction favorisant une collaboration bienveillante entre les parties prenantes
2. Objectif de soutenabilité forte
 - (a) Une interaction qui ne bloque pas l'action des parties prenantes (cette caractéristique est en tension avec le principe de précaution)
 - (b) Une interaction qui questionne les parties prenantes sur l'objectif de l'action menée
3. Approche des problèmes d'ingénierie pour la soutenabilité
 - (a) Une interaction qui porte une vision socio-technique des problèmes d'ingénierie
 - (b) Une interaction qui peut être modifiée selon le *milieu* c'est-à-dire que l'interaction peut différer selon l'usage en fonction des besoins des acteurs
 - (c) Une interaction conviviale
 - (d) Une interaction permettant une montée en compétence des parties prenantes du projet d'ingénierie
4. Expertise interactionnelle et compétences d'ingénierie pour la soutenabilité
 - (a) Une interaction qui met en oeuvre des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité
 - (b) Une interaction permettant une collaboration entre les parties prenantes d'un projet d'ingénierie
 - (c) Une interaction mobilisant différents niveaux d'expertises

La prochaine section va permettre de synthétiser les contributions de ma thèse.

8.3 Contributions

Deux types de contributions vont être présentées : les contributions théoriques et une contribution pour la société.

8.3.1 Contributions théoriques

Trois contributions théoriques ont été identifiées et vont être listées dans cette section.

1. **Un cadre pour penser l'ingénierie dans un paradigme de soutenabilité forte** : la contribution théorique principale de cette thèse est la permaingénierie, permettant de donner un cadre pour penser l'ingénierie dans un contexte de soutenabilité forte. Actuellement, ce manque de cadre met les acteurs de l'ingénierie dans une forme de dissonance cognitive. Les acteurs de l'ingénierie ont intégré un discours solide sur la soutenabilité, techno-critique mais sont dans l'incapacité de mettre en oeuvre pratiquement leurs discours dans des situations d'ingénierie.
2. **Une analyse par les interactions** : La méthode utilisée pour tester le cadre de la permaingénierie, via les interactions humains-machines est également une contribution théorique de cette thèse.
3. **Une transition vers la soutenabilité des systèmes socio-techniques** : Les expérimentations montrent qu'il n'est pas suffisant d'ajouter des caractéristiques à un outil ancré dans un paradigme de soutenabilité faible pour le "transformer" en un outil ancré dans un paradigme de soutenabilité forte. Un changement profond de la logique de l'outil est nécessaire. Ainsi, il est possible de formuler une hypothèse selon laquelle les outils et méthodes créés pour la permaingénierie doivent être conçus à partir d'un paradigme de soutenabilité forte.

8.3.2 Contribution pour la société

Cette thèse étant positionnée dans les sciences de la soutenabilité, il s'agit de définir les contributions sociétales qu'elle peut apporter.

Il semble que la contribution majeure pour la société est **la formation de praticiens de l'ingénierie pour accompagner la transition écologique**. La caractéristique 2 (objectif) de la permaingénierie est clairement définie avec des cadres conceptuels solides pour penser la soutenabilité forte (limites planétaires par exemple). De plus, la caractéristique 4 (expertise et compétences) de la permaingénierie est solide : l'expertise interactionnelle est bien définie et l'ensemble des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité stabilisé dans la littérature. La mise en place d'un parcours de formation cohérent avec un objectif de soutenabilité forte affichée permettant d'acquérir les compétences associées à la permaingénierie semble être une contribution claire et actionnable pour la société.

8.4 Perspectives d'application et de recherche

Plusieurs axes de travail pourraient être développés à la suite de ce travail de thèse. Ces axes vont être présentés dans cette section.

Axe 1 : Consolider la proposition de permaingénierie via l'étude des interactions humains-machines

Le point d'entrée pour tester le cadre de la permaingénierie a été celui des artefacts numériques. Ce point d'entrée permet de réaliser des expérimentations auprès des acteurs en testant différentes manières de médiatiser les caractéristiques de la permaingénierie, et de réaliser des expérimentations en situation de conception. Je suis convaincue que cet axe continue à être pertinent car il permet de mettre en lumière les écarts entre les discours et les pratiques des acteurs. Ce travail interdisciplinaire est à la croisée des communautés du *design for sustainability* et des interactions humains-machines soutenables.

Cet axe de travail peut être réalisé en modifiant plusieurs variables : (1) la manière dont l'ACV est médiatisée par exemple ou (2) en choisissant une autre méthode que l'ACV (la conception soutenable par exemple). (1) La proposition de prototype ACVnum s'est heurtée à plusieurs éléments, notamment la mise en oeuvre de la collaboration. Des travaux autour d'une autre manière de médiatiser la collaboration dans le prototype ACVnum pourraient être menés. Cet axe viendrait tester la validité de l'hypothèse selon laquelle un outil de soutenabilité faible ne peut pas devenir un outil de soutenabilité forte. (2) Également, des expérimentations basées sur d'autres outils que l'ACV pourraient être réalisées. En effet, l'ACV porte un paradigme techno-centré en contradiction avec la permaingénierie. Est-ce que ce paradigme techno-centré de l'ACV est modifiable ? Le choix d'une autre méthode d'analyse environnementale permettrait d'opter pour une méthode dont le paradigme est compatible avec la permaingénierie. Cela pourrait permettre d'obtenir des écarts plus faibles entre les discours et les pratiques des acteurs de la permaingénierie.

Ainsi, cet axe permettrait d'adresser un des verrous identifiés : l'écart entre l'appropriation d'une éthique du *care* visible dans le discours des acteurs de la permaingénierie et la difficulté de ces mêmes acteurs à mettre en oeuvre cette éthique dans des situations d'ingénierie pour la soutenabilité. Observer des acteurs qui mettent en oeuvre une éthique du *care* et les artefacts utilisés dans cette pratique permettrait de mieux comprendre cette adéquation.

Également, des travaux devront être réalisés afin de mieux comprendre le rôle des interactions humains-technologies dans l'évolution culturelle des groupes et des individus. Cela permettra de consolider l'hypothèse selon laquelle les interactions ont des influences mutuelles (entre humains et artefacts) et sont un point d'entrée pertinent pour étudier l'influence de la transition écologique sur l'ingénierie.

Axe 2 : Proposer et tester un cadre de formation mettant en pratique les compétences d'ingénierie pour la soutenabilité

Le cadre des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité fait l'objet d'un consensus dans la littérature scientifique. Cependant, peu d'écoles d'ingénieurs prennent explicitement ce cadre comme socle à la constitution des programmes de formation. La mise en place d'un cadre de formation tourné vers l'acquisition des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité permettrait de tester, en situation réelle, les effets d'une telle formation sur les futurs praticiens.

Cette proposition permettrait de développer l'empathie des étudiants-ingénieurs, notion qui manque cruellement, avec des expériences immersives et critiques, comme préconisé par [Zoltowski et al., 2012]. Les expériences immersives comprennent des interactions récurrentes et des sessions de feedback réguliers et itératifs avec les communautés partenaires. Les expériences critiques sont des moments où les étudiants remettent en cause leurs croyances. Il pourrait être intéressant d'observer la réaction des étudiants suivant ce parcours en contact avec des logiciels classiques et collaboratifs de l'ACV. Cela permettra de montrer que le contexte éducatif a un poids important sur la manière dont les ingénieurs mobilisent les outils et méthodes d'ingénierie pour la soutenabilité.

De plus, ce cadre de formation permettrait de tester différentes méthodes d'évaluation des compétences d'ingénierie pour la soutenabilité, champ nécessitant encore des études.

Axe 3 : Conduire des expérimentations dans des contextes de soutenabilité forte

Une des hypothèses fortes de cette thèse est qu'une ingénierie dans un paradigme de soutenabilité forte est forcément différente qu'une ingénierie pratiquée dans un paradigme de soutenabilité faible.

Ainsi, il pourrait être intéressant de continuer à étudier les pratiques de conception dans des contextes de soutenabilité forte. Des études en immersion dans des contextes de soutenabilité forte (éco-hameau par exemple) permettraient de mettre en évidence des méthodes de conception particulières à ces contextes. Mes travaux se sont concentrés sur la formalisation d'une permaingénierie. D'autres formes d'ingénierie pour la soutenabilité forte pourraient être identifiées.

L'expérimentation 2 de ma thèse a permis de réaliser une analyse de cycle de vie partielle dans un éco-hameau, avec en support le logiciel openLCA et le prototype ACVnum. Une proposition serait de mettre en oeuvre des artefacts non-numériques afin de comprendre quelle est la plus-value des artefacts numériques dans les démarches d'ingénierie pour la soutenabilité.

Par cette thèse, j'espère avoir contribué au développement des connaissances autour de l'ingénierie pour une transition soutenable des systèmes socio-techniques. Ce vaste champ de l'ingénierie pour la soutenabilité (ce plurivers de l'ingénierie !) est à explorer, à la fois pour les scientifiques et les praticiens. J'espère avoir participé au développement des imaginaires pour faire vivre une ingénierie compatible avec un espace sûr et juste pour l'humanité.

Bibliographie

- [Ackoff, 1989] Ackoff, R. L. (1989). From data to wisdom. *Journal of applied systems analysis*, 16(1) :3–9.
- [Alha et al., 2000] Alha, K., Holliger, C., Larsen, B. S., Purcell, P., and Rauch, W. (2000). Environmental engineering education-summary report of the 1st european seminar. *Water science and technology*, 41(2) :1–7.
- [Arnsperger and Bourg, 2016] Arnsperger, C. and Bourg, D. (2016). Vers une économie authentiquement circulaire. *Revue de l'OFCE*, N° 145(1) :91–125. Publisher : OFCE.
- [Bardzell et al., 2021] Bardzell, J., Bardzell, S., and Light, A. (2021). Wanting To Live Here : Design After Anthropocentric Functionalism. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, pages 1–24, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Berkhout and Hertin, 2004] Berkhout, F. and Hertin, J. (2004). De-materialising and re-materialising : digital technologies and the environment. *Futures*, 36(8) :903–920.
- [Berry, 1988] Berry, T. (1988). *The Dream of the Earth*, volume 1. Sierra club edition.
- [Biberhofer et al., 2019] Biberhofer, P., Lintner, C., Bernhardt, J., and Rieckmann, M. (2019). Facilitating work performance of sustainability-driven entrepreneurs through higher education : The relevance of competencies, values, worldviews and opportunities. *The International Journal of Entrepreneurship and Innovation*, 20(1) :21–38. Publisher : SAGE Publications.
- [Bijker et al., 1987] Bijker, W. E., Hughes, T. P., and Pinch, T. (1987). *The Social Construction of Technological Systems : New Directions in Sociology and History of Technology (25th Anniversary Edition with New Preface)*. MIT Press.
- [Björklund, 2002] Björklund, A. E. (2002). Survey of approaches to improve reliability in lca. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(2) :64–72.
- [Borgmann, 1987] Borgmann, A. (1987). *Technology and the character of contemporary life : A philosophical inquiry*. University of Chicago Press.
- [Borning and Muller, 2012] Borning, A. and Muller, M. (2012). Next steps for value sensitive design. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pages 1125–1134.
- [Borrion et al., 2019] Borrion, A., Matsushita, J., Austen, K., Johnson, C., and Bell, S. (2019). Development of LCA Calculator to support community infrastructure co-design. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(7) :1209–1221.

- [Bouhaddou et al., 2012] Bouhaddou, I., Benabdelhafid, A., Ouzizi, L., and Benghabrit, Y. (2012). PLM (Product Lifecycle Management) Model for Supply Chain Optimization. In Rivest, L., Bouras, A., and Louhichi, B., editors, *Product Lifecycle Management. Towards Knowledge-Rich Enterprises*, IFIP Advances in Information and Communication Technology, pages 134–146, Berlin, Heidelberg. Springer.
- [Boujut and Blanco, 2003] Boujut, J.-F. and Blanco, E. (2003). Intermediary Objects as a Means to Foster Co-operation in Engineering Design. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 12(2) :205–219.
- [Bourg, 2012] Bourg, D. (2012). Transition écologique, plutôt que développement durable. *Vraiment durable*, 1(1) :77–96. Bibliographie_available : 0 Cairndomain : www.cairn.info Cite Par_available : 1 Publisher : Victoires éditions.
- [Bouzin, 2021] Bouzin, A. (2021). L’engagement écologiste des ingénieurs français : des séquences narratives plurielles. In *9e Congrès de l’AFS, RT 22 «Parcours de vie et dynamiques sociales»*.
- [Braa and Rolland, 2000] Braa, K. and Rolland, K. H. (2000). Horizontal information systems : Emergent trends and perspectives. *Organizational and social perspectives on information technology*, pages 83–101.
- [Branderhorst, 2020] Branderhorst, G. (2020). Update to Limits to Growth : Comparing the World3 Model With Empirical Data. Accepted : 2020-09-11T11 :46 :05Z.
- [Bratec, 2020] Bratec, F. (2020). *Intégration de la variabilité géographique en conception responsable*. PhD thesis, Troyes.
- [Brynjarsdottir et al., 2012] Brynjarsdottir, H., Håkansson, M., Pierce, J., Baumer, E., DiSalvo, C., and Sengers, P. (2012). Sustainably unpersuaded : how persuasion narrows our vision of sustainability. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI ’12*, pages 947–956, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Buttol et al., 2012] Buttol, P., Buonamici, R., Naldesi, L., Rinaldi, C., Zamagni, A., and Masoni, P. (2012). Integrating services and tools in an ict platform to support eco-innovation in smes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(2) :211–221.
- [Buxton, 2010] Buxton, B. (2010). *Sketching user experiences : getting the design right and the right design*. Morgan kaufmann.
- [Calafat, 2011] Calafat, G. (2011). Expertise et compétences. Procédures, contextes et situations de légitimation. *Hypothèses*, 14(1) :95–107. Place : Paris Publisher : Éditions de la Sorbonne.
- [Cech, 2014] Cech, E. A. (2014). Culture of disengagement in engineering education? *Science, Technology, & Human Values*, 39(1) :42–72.
- [Ceschin and Gaziulusoy, 2016] Ceschin, F. and Gaziulusoy, I. (2016). Evolution of design for sustainability : From product design to design for system innovations and transitions. *Design Studies*, 47 :118–163.
- [Chatty et al., 2021] Chatty, T., Qu, Y., Ba-Sabaa, H. H., and Murnane, E. L. (2021). Examining the user experience of life cycle assessment tools and their ability to cater to ecodesign in early-stage product development practice. *Proceedings of the Design Society*, 1 :1441–1450.

- [Clark, 2007] Clark, W. C. (2007). *Sustainability science : a room of its own*, volume 104. National Acad Sciences. Issue : 6 Pages : 1737-1738 Publication Title : Proceedings of the National Academy of Sciences.
- [Collins et al., 2007] Collins, H., Evans, R., and Gorman, M. (2007). Trading zones and interactional expertise. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 38(4) :657–666.
- [Crutzen, 2006] Crutzen, P. J. (2006). The “Anthropocene”. In Ehlers, E. and Krafft, T., editors, *Earth System Science in the Anthropocene*, pages 13–18. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Cruz et al., 2021] Cruz, J., Bruhis, N., Kellam, N., and Jayasuriya, S. (2021). Students’ implicit epistemologies when working at the intersection of engineering and the arts. *International Journal of STEM Education*, 8(1) :1–17.
- [Damasio, 2019] Damasio, A. (2019). *Les furtifs*. La Volte.
- [de l’enseignement, 2011] de l’enseignement, M. (2011). Enseignements technologiques transversaux et enseignements spécifiques - cycle terminal de la série STI2D Description de la taxonomie utilisée. Technical report.
- [Demailly et al., 2016] Demailly, D., Carbone, V., Acquier, A., Massé, D., Roux, D., Borel, S., Benoit-Moreau, F., Guillard, V., Parguel, B., Berlingen, F., Cappello, M., De Grave, A., and Tincq, B. (2016). PICO - The collaborative economy, a pipeline of innovations for sustainable development. Summary of findings.
- [Denouël and Granjon, 2011] Denouël, J. and Granjon, F. (2011). *Communiquer à l’ère numérique : Regards croisés sur la sociologie des usages*. Presses des MINES.
- [Deuze, 2006] Deuze, M. (2006). Participation, Remediation, Bricolage : Considering Principal Components of a Digital Culture. *The Information Society*, 22(2) :63–75. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/01972240600567170>.
- [Dias de Figueiredo, 2014] Dias de Figueiredo, A. (2014). De la nature historique des pratiques d’ingénierie. *Revue d’anthropologie des connaissances*, 8, 2(2) :245–278. Place : Grenoble Publisher : S.A.C.
- [Dietz and Neumayer, 2007] Dietz, S. and Neumayer, E. (2007). Weak and strong sustainability in the SEEA : Concepts and measurement. *Ecological Economics*, 61(4) :617–626.
- [Dillahunt et al., 2009] Dillahunt, T., Mankoff, J., Paulos, E., and Fussell, S. (2009). It’s not all about "Green" : energy use in low-income communities. In *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing*, UbiComp ’09, pages 255–264, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Drot-Delange and Bruillard, 2012] Drot-Delange, B. and Bruillard, E. (2012). Éducation aux TIC, cultures informatique et du numérique : quelques repères historiques. *Études de communication. langages, information, médiations*, (38) :69–80. ISBN : 9782917562079 Number : 38 Publisher : Groupe d’Études et de Recherche Interdisciplinaire en Information et Communication de l’Université Lille 3.
- [du Coq à l’Âme, 2022] du Coq à l’Âme, O. (2022). Un éco-hameau solidaire pour être co-responsables de nos besoins et de nos impacts.

- [Ellis, 2021] Ellis, E. C. (2021). *L'Anthropocène*. EDP sciences. Google-Books-ID : 16FGAAAAQBAJ.
- [Escobar, 2015] Escobar, A. (2015). Degrowth, postdevelopment, and transitions : a preliminary conversation. *Sustainability Science*, 10(3) :451–462.
- [Escobar, 2018] Escobar, A. (2018). *Designs for the Pluriverse : Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds*. Duke University Press. Google-Books-ID : M0NRDwAAQBAJ.
- [Ferguson, 1994] Ferguson, J. (1994). *The anti-politics machine : " development," depoliticization, and bureaucratic power in Lesotho*. U of Minnesota Press.
- [Ferreboeuf et al., 2019] Ferreboeuf, H., Berthoud, F., Bihouix, P., Fabre, P., Kaplan, D., and Lefèvre, L. (2019). Lean ICT-towards digital sobriety. *Report for the Think Tank The Shift Project*, 6.
- [Figueiredo, 2008] Figueiredo, A. D. d. (2008). Toward an epistemology of engineering. In *2008 Workshop on Philosophy and Engineering, The Royal Academy of Engineering, London*.
- [Finkbeiner et al., 2006] Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., and Klüppel, H.-J. (2006). The New International Standards for Life Cycle Assessment : ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2) :80–85.
- [Fisher and Tronto, 1990] Fisher, B. and Tronto, J. (1990). Toward a feminist theory of caring. In *Circles of Care : Work and Identity in Women's Lives*, pages 35–62. SUNY Press.
- [Frické, 2009] Frické, M. (2009). The knowledge pyramid : a critique of the DIKW hierarchy. *Journal of Information Science*, 35(2) :131–142. Publisher : SAGE Publications Ltd.
- [Friedman and Hendry, 2019] Friedman, B. and Hendry, D. G. (2019). *Value sensitive design : Shaping technology with moral imagination*. Mit Press.
- [Friedman et al., 2006] Friedman, B., Kahn, P. H., and Borning, A. (2006). Value Sensitive Design and Information Systems. page 27.
- [Friedman et al., 2008] Friedman, B., Kahn, P. H., and Borning, A. (2008). Value Sensitive Design and Information Systems. In *The Handbook of Information and Computer Ethics*, pages 69–101. John Wiley & Sons, Ltd. Section : 4 _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470281819.ch4>.
- [Friedman and Kahn Jr, 2007] Friedman, B. and Kahn Jr, P. H. (2007). Human values, ethics, and design. In *The human-computer interaction handbook*, pages 1267–1292. CRC press.
- [Froehlich et al., 2010] Froehlich, J., Findlater, L., and Landay, J. (2010). *The design of eco-feedback technology*, volume 3. Journal Abbreviation : Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings Pages : 2008 Publication Title : Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings.
- [Frohmann, 2004] Frohmann, B. (2004). *Documentation Redux : Prolegomenon to (Another) Philosophy of Information*. Publisher : Graduate School of Library and Information Science. University of Illinois at Urbana-Champaign.

- [Gagnon et al., 2009] Gagnon, B., Leduc, R., and Savard, L. (2009). Sustainable Development in Engineering : A Review of Principles and Definition of a Conceptual Framework. *Environmental Engineering Science*, 26(10) :1459–1472. Publisher : Mary Ann Liebert, Inc., publishers.
- [Gagnon et al., 2012] Gagnon, B., Leduc, R., and Savard, L. (2012). From a conventional to a sustainable engineering design process : different shades of sustainability. *Journal of Engineering Design*, 23(1) :49–74. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/09544828.2010.516246>.
- [Galeano, 1993] Galeano, E. H. (1993). *Las palabras andantes*. Siglo xxi.
- [Gallie, 2019] Gallie, W. B. (2019). *Essentially Contested Concepts*. Cornell University Press. Pages : 121-146 Publication Title : The Importance of Language Section : The Importance of Language.
- [Geels, 2010] Geels, F. W. (2010). Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective. *Research policy*, 39(4) :495–510.
- [Geels and Schot, 2007] Geels, F. W. and Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3) :399–417.
- [Gero and Kannengiesser, 2004] Gero, J. S. and Kannengiesser, U. (2004). The situated function–behaviour–structure framework. *Design Studies*, 25(4) :373–391.
- [Ghoshal et al., 2020] Ghoshal, S., Mendhekar, R., and Bruckman, A. (2020). Toward a Grassroots Culture of Technology Practice. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 4(CSCW1) :pp 1–58.
- [Glavič, 2022] Glavič, P. (2022). Updated Principles of Sustainable Engineering. *Processes*, 10(5) :870. Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [Grimal et al., 2021a] Grimal, L., Burger, N., di Loreto, I., and Troussier, N. (2021a). Design of an interdisciplinary evaluation method for multi-scaled sustainability of computer-based projects. a work based on the sustainable computing evaluation framework (scef). In *LIMITS Workshop on Computing within Limits*.
- [Grimal et al., 2023a] Grimal, L., Di Loreto, I., and Troussier, N. (2023a). Value misalignments in interactions : an opportunity for sustainable hci.
- [Grimal et al., 2021b] Grimal, L., Loreto, I. d., and Troussier, N. (2021b). EXPLORATORY RESEARCH ON CULTURAL COMPUTING FOR HUMAN-COMPUTER INTERACTION. THE CASE OF SUSTAINABILITY. *Proceedings of the Design Society*, 1 :1471–1480. Publisher : Cambridge University Press.
- [Grimal et al., 2023b] Grimal, L., Loreto, I. d., and Troussier, N. (2023b). Defining permaengineering : new practices for strong sustainable contexts of design. *Proceedings of the Design Society*.
- [Grimal et al., 2021c] Grimal, L., Troussier, N., and Di Loreto, I. (2021c). Analyse exploratoire sur l’intérêt de l’informatique culturelle pour la conception d’ihm en ingénierie. In *17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA*.
- [Grimal et al., 2022] Grimal, L. M., Baudry, J., Charraud, P., Céret, R., and Troussier, N. (2022). Exploratory study on the role of institutional frameworks on engineering curricula evolution. *Design and Technology Education : an International Journal*, 27(1) :136–153.

- [Hansen, 2020] Hansen, A.-M. S. (2020). The App Is Not Where the Action Is : Discussing Features of an Internal Communication System for a Permaculture Village. In *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability, ICT4S2020*, pages 275–284, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Herrington, 2021] Herrington, G. (2021). Update to limits to growth : Comparing the World3 model with empirical data. *Journal of Industrial Ecology*, 25(3) :614–626.
_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jiec.13084>.
- [Hess and Fila, 2016] Hess, J. L. and Fila, N. D. (2016). The manifestation of empathy within design : findings from a service-learning course. *CoDesign*, 12(1-2) :93–111.
- [Hess et al., 2017] Hess, J. L., Strobel, J., and Brightman, A. O. (2017). The development of empathic perspective-taking in an engineering ethics course. *Journal of Engineering Education*, 106(4) :534–563.
- [Hess et al., 2016] Hess, J. L., Strobel, J., and Pan, R. (2016). Voices from the workplace : Practitioners’ perspectives on the role of empathy and care within engineering. *Engineering Studies*, 8(3) :212–242.
- [Hilty and Aebischer, 2015] Hilty, L. M. and Aebischer, B. (2015). ICT for Sustainability : An Emerging Research Field. In Hilty, L. M. and Aebischer, B., editors, *ICT Innovations for Sustainability, Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 3–36, Cham. Springer International Publishing.
- [Hinds, 2008] Hinds, C. (2008). The case against a positivist philosophy of requirements engineering. *Requirements engineering*, 13(4) :315–328.
- [Hopkins, 2010] Hopkins, R. (2010). *Manuel de Transition, de la dépendance au pétrole à la résilience locale*.
- [Hornborg, 2019] Hornborg, A. (2019). *Nature, Society, and Justice in the Anthropocene : Unraveling the Money-Energy-Technology Complex*. Cambridge University Press.
- [Hunt et al., 1996] Hunt, R. G., Franklin, W. E., and Hunt, R. G. (1996). LCA — How it came about. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1) :4–7.
- [Hur et al., 2005] Hur, T., Lee, J., Ryu, J., and Kwon, E. (2005). Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. *Journal of Environmental Management*, 75(3) :229–237.
- [Hölscher et al., 2018] Hölscher, K., Wittmayer, J. M., and Loorbach, D. (2018). Transition versus transformation : What’s the difference? *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 27 :1–3.
- [Jackson, 2009] Jackson, T. (2009). Prosperity without growth? : The transition to a sustainable economy.
- [Jeantet, 1998] Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. Éléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie du Travail*, 40(3) :291–316. Publisher : Elsevier Masson SAS.
- [Kajikawa, 2008] Kajikawa, Y. (2008). Research core and framework of sustainability science. *Sustainability Science*, 3(2) :215–239.
- [Kallis et al., 2014] Kallis, G., Demaria, F., and D’Alisa, G. (2014). Introduction : degrowth. In *Degrowth*, pages 1–18. Routledge.

- [Karahanna et al., 2005] Karahanna, E., Evaristo, J. R., and Srite, M. (2005). Levels of Culture and Individual Behavior : An Investigative Perspective. *Journal of Global Information Management (JGIM)*, 13(2) :1–20. Publisher : IGI Global.
- [Kauffman, 2009] Kauffman, J. (2009). Advancing sustainability science : report on the International Conference on Sustainability Science (ICSS) 2009. *Sustainability Science*, 4(2) :233–242. ISBN : 1862-4057 Publisher : Springer.
- [Kerschner et al., 2013] Kerschner, C., Prell, C., Feng, K., and Hubacek, K. (2013). Economic vulnerability to peak oil. *Global environmental change*, 23(6) :1424–1433.
- [Kettinger and Li, 2010] Kettinger, W. J. and Li, Y. (2010). The infological equation extended : towards conceptual clarity in the relationship between data, information and knowledge. *European Journal of Information Systems*, 19(4) :409–421.
- [Khmara and Kronenberg, 2020] Khmara, Y. and Kronenberg, J. (2020). Degrowth in the context of sustainability transitions : In search of a common ground. *Journal of Cleaner Production*, 267 :122072.
- [Kirchhoff, 2003] Kirchhoff, M. M. (2003). Promoting Green Engineering through Green Chemistry. *Environmental Science & Technology*, 37(23) :5349–5353. Publisher : American Chemical Society.
- [Klenk, 2021] Klenk, M. (2021). How Do Technological Artefacts Embody Moral Values ? *Philosophy & Technology*, 34(3) :525–544.
- [Klotz et al., 2018] Klotz, L., Weber, E., Johnson, E., Shealy, T., Hernandez, M., and Gordon, B. (2018). Beyond rationality in engineering design for sustainability. *Nature Sustainability*, 1(5) :225–233. Number : 5 Publisher : Nature Publishing Group.
- [Koggel, 1997] Koggel, C. M. (1997). Perspectives on equality : Constructing a relational theory.
- [Kroeber and Kluckhohn, 1952] Kroeber, A. L. and Kluckhohn, C. (1952). Culture : A critical review of concepts and definitions. *Papers. Peabody Museum of Archaeology & Ethnology, Harvard University*.
- [Kung et al., 2015] Kung, K.-H., Ho, C.-F., Hung, W.-H., and Wu, C.-C. (2015). Organizational adaptation for using PLM systems : Group dynamism and management involvement. *Industrial Marketing Management*, 44 :83–97.
- [Kvan, 2000] Kvan, T. (2000). Collaborative design : what is it ? *Automation in construction*, 9(4) :409–415.
- [Latouche, 2003] Latouche, S. (2003). L’impoture du développement durable ou les habits neufs du développement. *Mondes en développement*, 121(1) :23–30. Place : Louvain-la-Neuve Publisher : De Boeck Supérieur.
- [Laureillard et al., 1997] Laureillard, P., Boujut, J., and Jeantet, A. (1997). Conception intégrée et entités de coopération. *Les objets en conception, Actes de 01DESIGN*, 97 :105–119.
- [Legrenzi, 2015] Legrenzi, C. (2015). Informatique, numérique et système d’information : définitions, périmètres, enjeux économiques. *Vie & sciences de l’entreprise*, 200(2) :49–76. Place : Rueil-Malmaison Publisher : ANDESE.
- [Leibenstein, 1950] Leibenstein, H. (1950). Bandwagon, snob, and Veblen effects in the theory of consumers’ demand. *The quarterly journal of economics*, 64(2) :183–207. ISBN : 1531-4650 Publisher : MIT Press.

- [Light and Akama, 2014] Light, A. and Akama, Y. (2014). Structuring future social relations : the politics of care in participatory practice. In *Proceedings of the 13th Participatory Design Conference : Research Papers - Volume 1*, PDC '14, pages 151–160, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Liu et al., 2019a] Liu, S.-Y. C., Bardzell, J., and Bardzell, S. (2019a). Decomposition as Design : Co-Creating (with) Natureculture. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '19, pages 605–614, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Liu et al., 2018] Liu, S.-Y. C., Bardzell, S., and Bardzell, J. (2018). Out of control : reframing sustainable HCI using permaculture. In *Proceedings of the 2018 Workshop on Computing within Limits*, pages 1–8.
- [Liu et al., 2019b] Liu, W., Agusdinata, D. B., and Myint, S. W. (2019b). Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80 :145–156.
- [Lovelock and Margulis, 1974] Lovelock, J. E. and Margulis, L. (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere : the gaia hypothesis. *Tellus*, 26(1-2) :2–10. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.3402/tellusa.v26i1-2.9731>.
- [Lozano, 2015] Lozano, R. (2015). A holistic perspective on corporate sustainability drivers. *Corporate social responsibility and environmental management*, 22(1) :32–44.
- [Lunenburg, 2011] Lunenburg, F. C. (2011). Self-Efficacy in the Workplace : Implications for Motivation and Performance. *International journal of management, business, and administration*, 14 :6.
- [Masino and Zamarian, 2003] Masino, G. and Zamarian, M. (2003). Information technology artefacts as structuring devices in organizations : design, appropriation and use issues. *Interacting with Computers*, 15(5) :693–707. Conference Name : Interacting with Computers.
- [Meadows, 1999] Meadows, D. (1999). Leverage points. *Places to Intervene in a System*, 19.
- [Meadows et al., 1972] Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., and Behrens_III, W. (1972). *The Limits to Growth : A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York, universe books edition.
- [Meadows and Randers, 2004] Meadows, D. and Randers, J. (2004). *The Limits to Growth : The 30-year Update*. Routledge, London.
- [Mer et al., 1995] Mer, S., Jeantet, A., and Tichkiewitch, S. (1995). Les objets intermédiaires de la conception : modélisation et communication. *Le communicationnel pour concevoir*, pages 21–41.
- [Mingers, 1995] Mingers, J. C. (1995). Information and meaning : foundations for an intersubjective account. *Information Systems Journal*, 5(4) :285–306. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2575.1995.tb00100.x>.
- [Mitsch, 1993] Mitsch, W. (1993). Ecological engineering a cooperative role with the planetary life-support system. *Environmental Science & Technology*, 27(3) :438–445. ISBN : 0013-936X Publisher : ACS Publications.

- [Mitsch, 2012] Mitsch, W. J. (2012). What is ecological engineering? *Ecological Engineering*, 45 :5–12.
- [Moatti, 2012] Moatti, A. (2012). Le numérique, adjectif substantivé. *Le Débat*, 170(3) :133–137. Place : Paris Publisher : Gallimard.
- [Monnoyer-Smith, 2017] Monnoyer-Smith, L. (2017). Transition numérique et transition écologique. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 87(3) :5–7. Place : Paris Publisher : F.F.E.
- [Nakano and Hirao, 2011] Nakano, K. and Hirao, M. (2011). Collaborative activity with business partners for improvement of product environmental performance using Ica. *Journal of Cleaner Production*, 19(11) :1189–1197.
- [Nedelsky, 2008] Nedelsky, J. (2008). Reconceiving Rights and Constitutionalism. *Journal of Human Rights*, 7(2) :139–173. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/14754830802071950>.
- [Norton et al., 2019a] Norton, J., Penzenstadler, B., McDonald, S., Kang, E., Koirala, N., Konishi, R., Carmona, G. P., Shah, J., Troncoso, S., and Tomlinson, B. (2019a). The SAGE Community Coordinator : A Demonstration. In *Proceedings of the Fifth Workshop on Computing within Limits, LIMITS '19*, pages 1–10, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Norton et al., 2019b] Norton, J., Penzenstadler, B., and Tomlinson, B. (2019b). Implications of Grassroots Sustainable Agriculture Community Values on the Design of Information Systems. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 3(CSCW) :34 :1–34 :22.
- [Nunberg, 2002] Nunberg, G. (2002). Farewell to the Information Age. page 32.
- [on Environment and Development, 1987] on Environment and Development, W. C. (1987). Our common future.
- [Onishi, 2009] Onishi, A. (2009). *Integrated Global Models of Sustainable Development - Volume I*. EOLSS Publications. Google-Books-ID : ily0CwAAQBAJ.
- [Orlikowski, 1992] Orlikowski, W. J. (1992). The Duality of Technology : Rethinking the Concept of Technology in Organizations. *Organization Science*, 3(3) :398–427. Publisher : INFORMS.
- [O’Neill et al., 2018] O’Neill, D. W., Fanning, A. L., Lamb, W. F., and Steinberger, J. K. (2018). A good life for all within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 1(2) :88–95. Number : 2 Publisher : Nature Publishing Group.
- [Pacey, 1985] Pacey, A. (1985). *The Culture of Technology*. MIT Press. Google-Books-ID : JFfV7EopNPoC.
- [Pacey, 1992] Pacey, A. (1992). *The maze of ingenuity : Ideas and idealism in the development of technology*. Mit Press.
- [Persson et al., 2022] Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., de Wit, C. A., Diamond, M. L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M. W., Sogaard Jorgensen, P., Villarrubia-Gomez, P., Wang, Z., and Hauschild, M. Z. (2022). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental Science & Technology*, 56(3) :1510–1521. Publisher : American Chemical Society.

- [Petit and Guillaume, 2018] Petit, V. and Guillaume, B. (2018). We Have Never Been Wild : Towards an Ecology of the Technical Milieu. In Loeve, S., Guchet, X., and Bensaude Vincent, B., editors, *French Philosophy of Technology : Classical Readings and Contemporary Approaches*, Philosophy of Engineering and Technology, pages 81–100. Springer International Publishing, Cham.
- [Pezzey, 1992] Pezzey, J. C. (1992). Economic analysis of sustainable growth and sustainable development. Publisher : World Bank, Washington DC.
- [Picon, 2004] Picon, A. (2004). Engineers and engineering history : problems and perspectives. *History and Technology*, 20(4) :421–436. Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/0734151042000304367>.
- [Pierce et al., 2010] Pierce, J., Fan, C., Lomas, D., Marcu, G., and Paulos, E. (2010). Some consideration on the (in)effectiveness of residential energy feedback systems. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '10, pages 244–247, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Potts and Newstetter, 1997] Potts, C. and Newstetter, W. C. (1997). Naturalistic inquiry and requirements engineering : reconciling their theoretical foundations. In *Proceedings of ISRE'97 : 3rd IEEE International Symposium on Requirements Engineering*, pages 118–127. IEEE.
- [Quelhas et al., 2019] Quelhas, O. L. G., Lima, G. B. A., Ludolf, N. V.-E., Meiriño, M. J., Abreu, C., Anholon, R., Vieira Neto, J., and Rodrigues, L. S. G. (2019). Engineering education and the development of competencies for sustainability. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 20(4) :614–629. Publisher : Emerald Publishing Limited.
- [Rauterberg, 2015] Rauterberg, M. (2015). From Personal to Cultural Computing : how to assess a cultural experience. page 10.
- [Raworth, 2017] Raworth, K. (2017). A Doughnut for the Anthropocene : humanity's compass in the 21st century. *The Lancet Planetary Health*, 1(2) :e48–e49. Publisher : Elsevier.
- [Rebitzer et al., 2004] Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B. P., and Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment : Part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international*, 30(5) :701–720.
- [Redman and Wiek, 2021] Redman, A. and Wiek, A. (2021). Competencies for advancing transformations towards sustainability. In *Frontiers in Education*, volume 6, page 785163. Frontiers Media SA.
- [Redman et al., 2021] Redman, A., Wiek, A., and Barth, M. (2021). Current practice of assessing students' sustainability competencies : A review of tools. *Sustainability Science*, 16(1) :117–135.
- [Reyes et al., 2009] Reyes, T., Rohmer, S., et al. (2009). The trojan horse method as a vector of ecodesign integration : a case study at a french sme. In *DS 58-7 : Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 7, Design for X/Design to X, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009*, pages 173–184.

- [Rice et al., 1997] Rice, G., Clift, R., and Burns, R. (1997). Comparison of currently available european LCA software. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2(1) :53–59.
- [Rice, 2013] Rice, M. (2013). Spanning disciplinary, sectoral and international boundaries : a sea change towards transdisciplinary global environmental change research? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3-4) :409–419.
- [Rio et al., 2019] Rio, M., Blondin, F., and Zwolinski, P. (2019). Investigating Product Designer LCA Preferred Logics and Visualisations. *Procedia CIRP*, 84 :191–196.
- [Rockström et al., 2009a] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., and Schellnhuber, H. J. (2009a). A safe operating space for humanity. *nature*, 461(7263) :472–475. ISBN : 1476-4687 Publisher : Nature Publishing Group.
- [Rockström et al., 2009b] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., and Schellnhuber, H. J. (2009b). Planetary boundaries : exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2). ISBN : 1708-3087 Publisher : JSTOR.
- [Roussilhe, 2021] Roussilhe, G. (2021). Empreinte environnementale des systèmes numériques et gouvernance. Technical report.
- [Roux-Rosier et al., 2018] Roux-Rosier, A., Azambuja, R., and Islam, G. (2018). Alternative visions : Permaculture as imaginaries of the anthropocene. *Organization*, 25(4) :550–572.
- [Rowley, 2007] Rowley, J. (2007). The wisdom hierarchy : representations of the DIKW hierarchy. *Journal of Information Science*, 33(2) :163–180. Publisher : SAGE Publications Ltd.
- [Roy et al., 2009] Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., and Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (lca) on some food products. *Journal of food engineering*, 90(1) :1–10.
- [Saenz et al., 2018] Saenz, M., Promann, M., Creager, A., and Rasche, N. (2018). Below the Interface : Evaluation of PLM Software Usability and User Self-efficacy. In Marcus, A. and Wang, W., editors, *Design, User Experience, and Usability : Theory and Practice*, Lecture Notes in Computer Science, pages 741–757, Cham. Springer International Publishing.
- [Sbea and Guzzo, 1987] Sbea, G. P. and Guzzo, R. A. (1987). Group effectiveness : What really matters? *Sloan Management Review (1986-1998)*, 28(3) :25.
- [Seager et al., 2012] Seager, T., Selinger, E., and Wiek, A. (2012). Sustainable Engineering Science for Resolving Wicked Problems. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 25(4) :467–484.
- [Sinclair et al., 2008] Sinclair, A. J., Diduck, A., and Fitzpatrick, P. (2008). Conceptualizing learning for sustainability through environmental assessment : critical reflections on 15 years of research. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7) :415–428.
- [Spangenberg, 2011] Spangenberg, J. H. (2011). Sustainability science : a review, an analysis and some empirical lessons. *Environmental Conservation*, 38(3) :275–287. Publisher : Cambridge University Press.

- [Steffen et al., 2015a] Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., and Ludwig, C. (2015a). The trajectory of the Anthropocene : The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1) :81–98. Publisher : SAGE Publications.
- [Steffen et al., 2015b] Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. d., Wit, C. A. d., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., and Sörlin, S. (2015b). Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). Publisher : American Association for the Advancement of Science Section : Research Article.
- [Steffen et al., 2020] Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Schellnhuber, H. J., Dube, O. P., Dutreuil, S., Lenton, T. M., and Lubchenco, J. (2020). The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1) :54–63. Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group.
- [Sterling, 2010] Sterling, S. (2010). Transformative Learning and Sustainability : sketching the conceptual ground. *Learning and Teaching in Higher Education*(5) :18.
- [Streed et al., 2021] Streed, A., Kantar, M., Tomlinson, B., and Raghavan, B. (2021). How Sustainable is the Smart Farm ? In *LIMITS Workshop on Computing within Limits*.
- [Strengers, 2008] Strengers, Y. (2008). Smart metering demand management programs : challenging the comfort and cleanliness habitus of households. In *Proceedings of the 20th Australasian Conference on Computer-Human Interaction : Designing for Habitus and Habitat*, OZCHI '08, pages 9–16, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Strengers, 2011] Strengers, Y. A. (2011). Designing eco-feedback systems for everyday life. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 2135–2144, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Terzi et al., 2010] Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., and , D. K. (2010). Product lifecycle management – from its history to its new role. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 4(4) :360–389. Publisher : Inderscience Publishers.
- [Testa et al., 2022] Testa, F., Tessitore, S., Buttol, P., Iraldo, F., and Cortesi, S. (2022). How to overcome barriers limiting lca adoption ? the role of a collaborative and multi-stakeholder approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(7) :944–958.
- [Thissen, 1976] Thissen, W. (1976). Investigations into the World3 Model : The Capital and Resource Subsystem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-6(7) :455–466. Conference Name : IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.
- [Toombs et al., 2015] Toombs, A. L., Bardzell, S., and Bardzell, J. (2015). The Proper Care and Feeding of Hackerspaces : Care Ethics and Cultures of Making. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pages 629–638, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Torraco, 2005] Torraco, R. J. (2005). Writing Integrative Literature Reviews : Guidelines and Examples. *Human Resource Development Review*, 4(3) :356–367. Publisher : SAGE Publications.

- [Tosa, 2016] Tosa, N. (2016). Computing culture. *Springer Series on Cultural Computing*, pages 67–116.
- [Tosa et al., 2004] Tosa, N., Matsuoka, S., and Thomas, H. (2004). Inter-culture computing : ZENetic computer. In *ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies on - SIGGRAPH '04*, page 11, Los Angeles, California. ACM Press.
- [Turner, 2008] Turner, G. M. (2008). A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality. *Global Environmental Change*, 18(3) :397–411.
- [UNESCO, 2017] UNESCO (2017). *Education for Sustainable Development Goals : learning objectives*. Paris : UNESCO, 2017.
- [van de Poel and Kroes, 2014] van de Poel, I. and Kroes, P. (2014). Can Technology Embody Values? In Kroes, P. and Verbeek, P.-P., editors, *The Moral Status of Technical Artefacts*, Philosophy of Engineering and Technology, pages 103–124. Springer Netherlands, Dordrecht.
- [Vernadsky, 1998] Vernadsky, V. I. (1998). *The Biosphere*. Springer Science & Business Media. Google-Books-ID : nUWsbRh5c7cC.
- [Vial, 2019] Vial, G. (2019). Understanding digital transformation : A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2) :118–144.
- [Vinck, 1992] Vinck, D. (1992). *Du laboratoire aux réseaux : Le travail scientifique en mutation. Politique de la science et de la technologie, Rapport de recherche FAST, 1992.= Laboratories networks : changes in scientific labor. Science and Technology Policy, FAST Research Report, 1992. EUR 14487 FR.*
- [Vinck, 2009a] Vinck, D. (2009a). De l’objet intermédiaire à l’objet-frontière. *Revue d’anthropologie des connaissances*, 3(1) :51–72.
- [Vinck, 2009b] Vinck, D. (2009b). De l’objet intermédiaire à l’objet-frontière. vers la prise en compte du travail d’équipement. *Revue d’anthropologie des connaissances*, 3(3-1).
- [Vinck and Laureillard, 1996] Vinck, D. and Laureillard, P. (1996). Coordination par les objets dans les processus de conception. In *Représenter, Attribuer, Coordonner*, pages 289–295.
- [Vérin, 1993] Vérin, H. (1993). *La Gloire des ingénieurs*. Albin Michel. Google-Books-ID : eqSjUmoeYggC.
- [Walther et al., 2020] Walther, J., Brewer, M. A., Sochacka, N. W., and Miller, S. E. (2020). Empathy and engineering formation. *Journal of Engineering Education*, 109(1) :11–33.
- [Wang-Erlandsson et al., 2022] Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R. J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., and Singh, C. (2022). A planetary boundary for green water. *Nature Reviews Earth & Environment*, pages 1–13. ISBN : 2662-138X Publisher : Nature Publishing Group.
- [Weinstein et al., 2013] Weinstein, M. P., Turner, R. E., and Ibáñez, C. (2013). The global sustainability transition : it is more than changing light bulbs. *Sustainability : Science, Practice and Policy*, 9(1) :4–15. ISBN : 1548-7733 Publisher : Taylor & Francis.
- [Wiek et al., 2011] Wiek, A., Withycombe, L., and Redman, C. L. (2011). Key competencies in sustainability : a reference framework for academic program development. *Sustainability Science*, 6(2) :203–218.

- [Williams Jr, 1979] Williams Jr, R. M. (1979). Change and stability in values and value systems : A sociological perspective. *Understanding human values*, 15 :46.
- [Winograd et al., 1986] Winograd, T., Flores, F., and Flores, F. F. (1986). *Understanding computers and cognition : A new foundation for design*. Intellect Books.
- [Zoltowski et al., 2012] Zoltowski, C. B., Oakes, W. C., and Cardella, M. E. (2012). Students' ways of experiencing human-centered design. *Journal of Engineering Education*, 101(1) :28–59.

Annexes

9.1 Annexe 1 : questionnaires de récolte de données sur les compétences (expérimentation 1)

Cette section comprend les 3 questionnaires réalisés lors de l'expérimentation 1.

9.1.1 Questionnaire 1 : évaluation des compétences - début du semestre

Description du questionnaire :

Ce questionnaire est en 2 temps :

Dans un premier temps vous aurez des questions concernant vos compétences actuelles (de préférences mettez des exemples liés à vos précédentes expériences en analyse de cycle de vie, si vous en avez). Dans un deuxième temps, vous aurez des questions concernant votre relation à l'écologie et à la technologie.

Questions et réponses du questionnaire :

Question 1 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à travailler dans un groupe interdisciplinaire" ?

ça veut dire quoi ? Cela veut dire que vous êtes capable de comprendre des opinions et des besoins différents les uns des autres, que vous êtes capable de faire preuve d'empathie envers les autres membres de votre groupe.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est l'interdisciplinarité, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de l'interdisciplinarité.
- Niveau 3 : Je connais l'interdisciplinarité car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : Je sais gérer des groupes interdisciplinaires, je connais le concept, les outils techniques et méthodologiques.

— Je ne sais pas.

Question 2 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 3 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à avoir de l'esprit critique" ?

C'est quoi avoir de l'esprit critique ? C'est la capacité de questionner les standards, les pratiques des autres, les opinions des autres, mais également ses propres opinions et cheminements de pensée.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est l'esprit critique mais je n'en ai pas beaucoup.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de ce qu'est l'esprit critique, j'en ai un peu développé.
- Niveau 3 : J'essaie régulièrement de développer mon esprit critique.
- Niveau 4 : J'ai de l'esprit critique car j'ai des outils méthodologiques que je mets en pratique régulièrement.
- Je ne sais pas.

Question 4 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 5 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la "compétence normative" ?

Ça veut dire quoi "compétence normative" ? C'est la capacité à comprendre et réfléchir sur les standards et valeurs de groupes de personnes, mais également de négocier des valeurs, principes et objectifs dans des contextes de conflits d'intérêts, de concessions et de contradictions. Donc il s'agit de faire des compromis entre des modes de fonctionnements différents entre des groupes d'individus.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la compétence normative, sans vraiment pouvoir en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la compétence normative.
- Niveau 3 : Je connais bien cette compétence car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : Je sais gérer des groupes en conflits portant des valeurs différentes, je connais les concepts en jeu et les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 6 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 7 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à résoudre des problèmes" ?

Ça veut dire quoi "résoudre des problèmes" ? C'est la capacité à comprendre un problème complexe relié à la soutenabilité et développer des solutions viables, inclusives et équitables. C'est au final la capacité à concevoir des solutions qui répondent à des besoins spécifiques (bien-être, sécurité, culturel, etc).

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : je comprends cette compétence mais je ne peux pas en parler.
- Niveau 2 : je comprends cette compétence et je peux en parler.
- Niveau 3 : Je connais cette compétence car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : J'ai déjà mis en oeuvre cette compétence, je connais les concepts en jeu ainsi que les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 8 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 9 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "pensée systémique" ?

C'est quoi penser de manière systémique ? C'est la capacité d'identifier et comprendre les interactions entre les systèmes, les humains, dans des contextes différents sur les plans sociaux, culturels, environnementaux, commerciaux légaux, politiques.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la pensée systémique sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la pensée systémique.
- Niveau 3 : Je sais comment penser de manière systémique car je le fais de temps en temps.
- Niveau 4 : Je sais comment penser de manière systémique, je connais et mets en oeuvre des outils techniques et méthodologiques pour cela.
- Je ne sais pas.

Question 10 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 11 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "connaissance de soi" ?

C'est quoi avoir de la connaissance de soi ? Je me connais vu que je suis moi non ? C'est la capacité à questionner son rôle au sein d'une communauté et une société, d'évaluer continuellement ses actions et savoir gérer ses sentiments et désires.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la connaissance de soi mais je ne suis pas à l'aise avec cette compétence.
- Niveau 2 : Je comprends ce qu'est cette compétence et je suis capable de m'exprimer dessus.
- Niveau 3 : Je connais cette compétence et je la pratique.
- Niveau 4 : Je me connais bien et j'utilise des outils techniques et méthodologiques pour la mettre en oeuvre.
- Je ne sais pas.

Question 12 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 13 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la "compétence stratégique" ? C'est quoi une compétence stratégique ? C'est la capacité à développer et implémenter des actions innovantes qui promeuvent la soutenabilité à un niveau local et dans des contextes plus larges.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la compétence stratégique, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la compétence stratégique.
- Niveau 3 : Je connais la compétence stratégique car je l'ai pratiquée au moins une fois sur un territoire.
- Niveau 4 : Je sais gérer un projet stratégique soutenable sur un territoire, je connais des outils techniques et méthodologiques pour cela.
- Je ne sais pas.

Question 14 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 15 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "contextualisation et vision du futur" ?

C'est quoi avoir la capacité de contextualisation et vision du futur ? C'est la capacité à comprendre pourquoi certaines connaissances sont nécessaires pour concevoir des solutions et leurs conséquences dans un contexte large (conséquences techniques, économiques, culturelles, juridiques, écologiques, etc).

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est cette compétence, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends cette compétence et je suis à l'aise pour en parler.
- Niveau 3 : J'ai déjà dû faire un travail de contextualisation.
- Niveau 4 : Je sais bien contextualiser dans des projets de conception, je connais les concepts en jeu, les outils techniques et méthodologiques pour faire cela.
- Je ne sais pas.

Question 16 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 17 : Bravo ! Vous êtes arrivés au bout du questionnaire !! Enfin presque... Il me reste quelques questions à vous poser par rapport à vous (votre parcours, la place de l'écologie dans votre vie, etc). Il s'agit de 4 questions. La première est facile... .. Qu'est-ce que vous avez fait avant d'arriver en IMEDD¹ ?

Question 18 : Quelle place prend l'écologie dans votre vie ? Comment est-ce que vous vous êtes intéressé à ce sujet ? Est-ce que vous êtes plutôt novices dans le domaine, bobo

1. Master Ingénierie en management de l'environnement et du développement durable

écologique ou bien futur membre d'une ZAD ? Est-ce que pour vous l'écologie c'est quelque chose qui vous touche professionnellement ou personnellement, ou les deux ?

Question 19 : Pensez-vous que la technologie va permettre de résoudre les problématiques écologiques ? Pourquoi ? Quelle est pour vous la place de l'ingénieur dans cette transition écologique ?

Question 20 : Pour vous, quelle est la place de l'ACV dans la transition écologique ?

9.1.2 Questionnaire 2 : évaluation des compétences - milieu du semestre

Description du questionnaire :

Ce questionnaire est centré uniquement sur les compétences que vous avez développées au cours de la première partie du semestre de l'unité d'enseignement (1ère partie = re-production d'une ACV existante).

Vous aurez des questions concernant vos compétences développées jusqu'à aujourd'hui par rapport aux éléments de l'unité d'enseignement "Évaluation environnementale". Nous vous demandons de mettre des exemples liés au cours (si vous en avez).

Questions et réponses du questionnaire :

Question 1 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à travailler dans un groupe interdisciplinaire" ?

ça veut dire quoi ? Cela veut dire que vous êtes capable de comprendre des opinions et des besoins différents les uns des autres, que vous êtes capable de faire preuve d'empathie envers les autres membres de votre groupe.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est l'interdisciplinarité, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de l'interdisciplinarité.
- Niveau 3 : Je connais l'interdisciplinarité car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : Je sais gérer des groupes interdisciplinaires, je connais le concept, les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 2 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 3 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à avoir de l'esprit critique" ?

C'est quoi avoir de l'esprit critique ? C'est la capacité de questionner les standards, les pratiques des autres, les opinions des autres, mais également ses propres opinions et cheminements de pensée.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est l'esprit critique mais je n'en ai pas beaucoup.

- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de ce qu'est l'esprit critique, j'en ai un peu développé.
- Niveau 3 : J'essaie régulièrement de développer mon esprit critique.
- Niveau 4 : J'ai de l'esprit critique car j'ai des outils méthodologiques que je mets en pratique régulièrement.
- Je ne sais pas.

Question 4 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 5 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la "compétence normative" ?

Ça veut dire quoi "compétence normative" (même pour moi ça a longtemps été flou cette affaire!) ? C'est la capacité à comprendre et réfléchir sur les standards et valeurs de groupes de personnes, mais également de négocier des valeurs, principes et objectifs dans des contextes de conflits d'intérêts, de concessions et de contradictions. Donc il s'agit de faire des compromis entre des modes de fonctionnements différents entre des groupes d'individus.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la compétence normative, sans vraiment pouvoir en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la compétence normative.
- Niveau 3 : Je connais bien cette compétence car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : Je sais gérer des groupes en conflits portant des valeurs différentes, je connais les concepts en jeu et les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 6 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 7 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à résoudre des problèmes" ?

Ça veut dire quoi "résoudre des problèmes" ? C'est la capacité à comprendre un problème complexe relié à la soutenabilité et développer des solutions viables, inclusives et équitables. C'est au final la capacité à concevoir des solutions qui répondent à des besoins spécifiques (bien-être, sécurité, culturel, etc).

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : je comprends cette compétence mais je ne peux pas en parler.
- Niveau 2 : je comprends cette compétence et je peux en parler.
- Niveau 3 : Je connais cette compétence car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : J'ai déjà mis en oeuvre cette compétence, je connais les concepts en jeu ainsi que les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 8 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 9 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "pensée systémique" ?

C'est quoi penser de manière systémique ? C'est la capacité d'identifier et comprendre les interactions entre les systèmes, les humains, dans des contextes différents sur les plans sociaux, culturels, environnementaux, commerciaux légaux, politiques.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la pensée systémique sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la pensée systémique.
- Niveau 3 : Je sais comment penser de manière systémique car je le fais de temps en temps.
- Niveau 4 : Je sais comment penser de manière systémique, je connais et mets en oeuvre des outils techniques et méthodologiques pour cela.
- Je ne sais pas.

Question 10 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 11 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "connaissance de soi" ?

C'est quoi avoir de la connaissance de soi ? Je me connais vu que je suis moi non ? C'est la capacité à questionner son rôle au sein d'une communauté et une société, d'évaluer continuellement ses actions et savoir gérer ses sentiments et désires.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la connaissance de soi mais je ne suis pas à l'aise avec cette compétence.
- Niveau 2 : Je comprends ce qu'est cette compétence et je suis capable de m'exprimer dessus.
- Niveau 3 : Je connais cette compétence et je la pratique.
- Niveau 4 : Je me connais bien et j'utilise des outils techniques et méthodologiques pour la mettre en oeuvre.
- Je ne sais pas.

Question 12 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 13 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la "compétence stratégique" ?

C'est quoi une compétence stratégique ? C'est la capacité à développer et implémenter des actions innovantes qui promeuvent la soutenabilité à un niveau local et dans des contextes plus larges.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la compétence stratégique, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la compétence stratégique.
- Niveau 3 : Je connais la compétence stratégique car je l'ai pratiquée au moins une fois sur un territoire.
- Niveau 4 : Je sais gérer un projet stratégique soutenable sur un territoire, je connais des outils techniques et méthodologiques pour cela.
- Je ne sais pas.

Question 14 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 15 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "contextualisation et vision du future" ?

C'est quoi avoir la capacité de contextualisation et vision du futur ? C'est la capacité à comprendre pourquoi certaines connaissances sont nécessaires pour concevoir des solutions et leurs conséquences dans un contexte large (conséquences techniques, économiques, culturelles, juridiques, écologiques, etc).

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est cette compétence, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends cette compétence et je suis à l'aise pour en parler.
- Niveau 3 : J'ai déjà dû faire un travail de contextualisation.
- Niveau 4 : Je sais bien contextualiser dans des projets de conception, je connais les concepts en jeu, les outils techniques et méthodologiques pour faire cela.
- Je ne sais pas.

Question 16 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

9.1.3 Questionnaire 3 : évaluation des compétences - fin du semestre

Description du questionnaire :

Ce questionnaire porte sur vos compétences dans le cadre de cette unité d'enseignement. Ce travail va être utilisé dans le cadre des travaux de recherche de thèse de Lou Grimal sur l'ACV. Plus vos réponses seront complètes, plus les résultats pourront être exploités :)

Pour ce questionnaire, nous vous demandons de parler uniquement de l'unité d'enseignement en ACV (et non sur d'autres unités d'enseignement du master;-)) et comment certaines activités pédagogiques ou moments dans votre travail dans cette unité d'enseignement (travail sur le logiciel, le connecteur, lecture de la norme) ont impacté vos compétences.

Questions et réponses du questionnaire :

Question 1 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à travailler dans un groupe interdisciplinaire" ?

ça veut dire quoi ? Cela veut dire que vous êtes capable de comprendre des opinions et des besoins différents les uns des autres, que vous êtes capable de faire preuve d'empathie envers les autres membres de votre groupe.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est l'interdisciplinarité, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de l'interdisciplinarité.
- Niveau 3 : Je connais l'interdisciplinarité car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : Je sais gérer des groupes interdisciplinaires, je connais le concept, les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 2 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 3 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à avoir de l'esprit critique" ?

C'est quoi avoir de l'esprit critique ? C'est la capacité de questionner les standards, les pratiques des autres, les opinions des autres, mais également ses propres opinions et cheminements de pensée.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est l'esprit critique mais je n'en ai pas beaucoup.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de ce qu'est l'esprit critique, j'en ai un peu développé.
- Niveau 3 : J'essaie régulièrement de développer mon esprit critique.
- Niveau 4 : J'ai de l'esprit critique car j'ai des outils méthodologiques que je mets en pratique régulièrement.
- Je ne sais pas.

Question 4 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 5 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la "compétence normative" ?

Ça veut dire quoi "compétence normative" ? C'est la capacité à comprendre et réfléchir sur les standards et valeurs de groupes de personnes, mais également de négocier des valeurs, principes et objectifs dans des contextes de conflits d'intérêts, de concessions et de contradictions. Donc il s'agit de faire des compromis entre des modes de fonctionnements différents entre des groupes d'individus.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.

- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la compétence normative, sans vraiment pouvoir en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la compétence normative.
- Niveau 3 : Je connais bien cette compétence car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : Je sais gérer des groupes en conflits portant des valeurs différentes, je connais les concepts en jeu et les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 6 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 7 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "contextualisation et vision du futur" ?

C'est quoi avoir la capacité de contextualisation et vision du futur ? C'est la capacité à comprendre pourquoi certaines connaissances sont nécessaires pour concevoir des solutions et leurs conséquences dans un contexte large (conséquences techniques, économiques, culturelles, juridiques, écologiques, etc).

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est cette compétence, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends cette compétence et je suis à l'aise pour en parler.
- Niveau 3 : J'ai déjà dû faire un travail de contextualisation.
- Niveau 4 : Je sais bien contextualiser dans des projets de conception, je connais les concepts en jeu, les outils techniques et méthodologiques pour faire cela.
- Je ne sais pas.

Question 8 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 9 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "pensée systémique" ?

C'est quoi penser de manière systémique ? C'est la capacité d'identifier et comprendre les interactions entre les systèmes, les humains, dans des contextes différents sur les plans sociaux, culturels, environnementaux, commerciaux légaux, politiques.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la pensée systémique sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la pensée systémique.
- Niveau 3 : Je sais comment penser de manière systémique car je le fais de temps en temps.
- Niveau 4 : Je sais comment penser de manière systémique, je connais et mets en oeuvre des outils techniques et méthodologiques pour cela.
- Je ne sais pas.

Question 10 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ?
Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 11 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "capacité à résoudre des problèmes" ?

Ça veut dire quoi "résoudre des problèmes" ? C'est la capacité à comprendre un problème complexe relié à la soutenabilité et développer des solutions viables, inclusives et équitables. C'est au final la capacité à concevoir des solutions qui répondent à des besoins spécifiques (bien-être, sécurité, culturel, etc).

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : je comprends cette compétence mais je ne peux pas en parler.
- Niveau 2 : je comprends cette compétence et je peux en parler.
- Niveau 3 : Je connais cette compétence car je l'ai pratiquée.
- Niveau 4 : J'ai déjà mis en oeuvre cette compétence, je connais les concepts en jeu ainsi que les outils techniques et méthodologiques.
- Je ne sais pas.

Question 12 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ?
Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 13 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la compétence "connaissance de soi" ?

C'est quoi avoir de la connaissance de soi ? Je me connais vu que je suis moi non ? C'est la capacité à questionner son rôle au sein d'une communauté et une société, d'évaluer continuellement ses actions et savoir gérer ses sentiments et désires.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.
- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la connaissance de soi mais je ne suis pas à l'aise avec cette compétence.
- Niveau 2 : Je comprends ce qu'est cette compétence et je suis capable de m'exprimer dessus.
- Niveau 3 : Je connais cette compétence et je la pratique.
- Niveau 4 : Je me connais bien et j'utilise des outils techniques et méthodologiques pour la mettre en oeuvre.
- Je ne sais pas.

Question 14 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ?
Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 15 : Quel est le niveau que vous vous donnez dans la "compétence stratégique" ?

C'est quoi une compétence stratégique ? C'est la capacité à développer et implémenter des actions innovantes qui promeuvent la soutenabilité à un niveau local et dans des contextes plus larges.

Réponses proposées :

- Niveau 0 : Je n'ai jamais développé cette compétence.

- Niveau 1 : Je comprends ce qu'est la compétence stratégique, sans vraiment être capable d'en parler.
- Niveau 2 : Je comprends et je peux parler de la compétence stratégique.
- Niveau 3 : Je connais la compétence stratégique car je l'ai pratiquée au moins une fois sur un territoire.
- Niveau 4 : Je sais gérer un projet stratégique soutenable sur un territoire, je connais des outils techniques et méthodologiques pour cela.
- Je ne sais pas.

Question 16 : Pouvez-vous donner un exemple permettant de justifier votre choix ? Si non, indiquez que c'est uniquement un ressenti.

Question 17 : Est-ce que la place de l'écologie dans votre vie a évolué suite au master ? Comment ?

Question 18 : Après 4 mois à apprendre ce qu'est l'ACV, pour vous, quelle est la place de l'ACV dans la transition écologique ?

9.1.4 Correspondance des niveaux qualitatifs et quantitatifs pour les questionnaires

TABLE 9.1 – Équivalence entre les réponses qualitatives des questionnaires et les niveaux quantitatifs définis pour les tests statistiques

Niveau quantitatif	Équivalence qualitative
0	Je n'ai jamais développé cette compétence
1	Je comprends cette compétence mais je ne peux pas en parler
2	Je comprends cette compétence et je peux en parler
3	J'ai pratiqué cette compétence au moins une fois
4	Je maîtrise des outils et méthodes pour pratiquer cette compétence
Imputation par la moyenne	Je ne sais pas

9.2 Annexe 2 : diagrammes de répartition des réponses aux questionnaires (expérimentation 1)

Travail dans un groupe interdisciplinaire - Groupes ACVnum

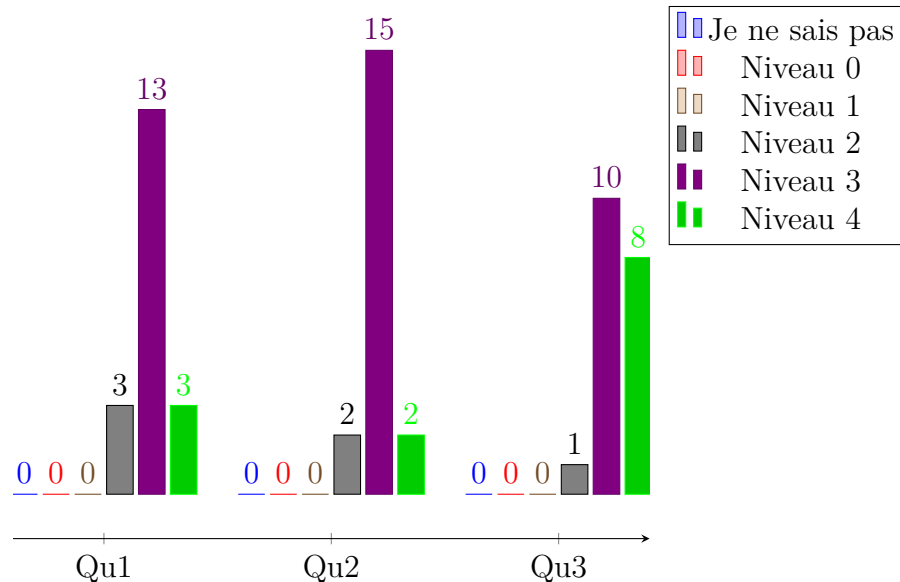


FIGURE 9.1 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire"

Travail dans un groupe interdisciplinaire - Groupes Témoins

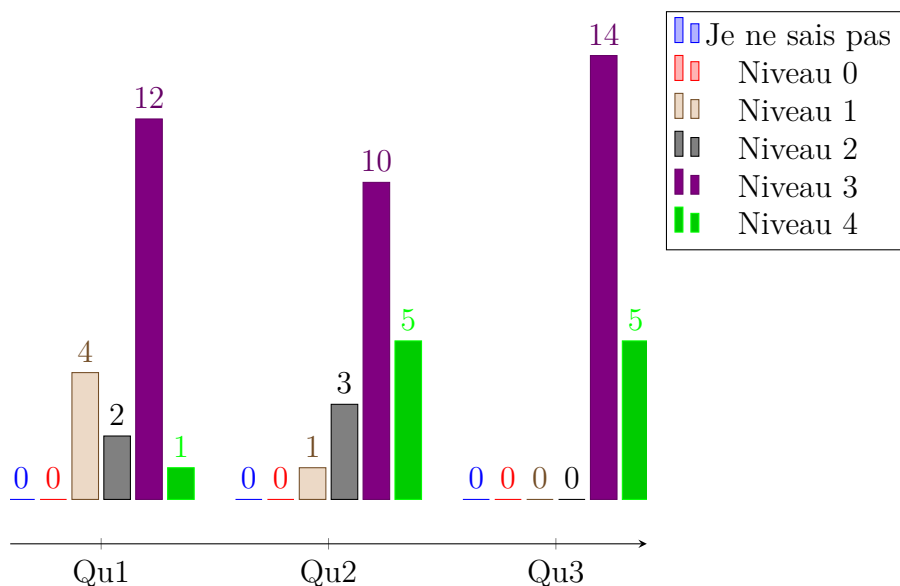


FIGURE 9.2 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Travail dans un groupe interdisciplinaire"

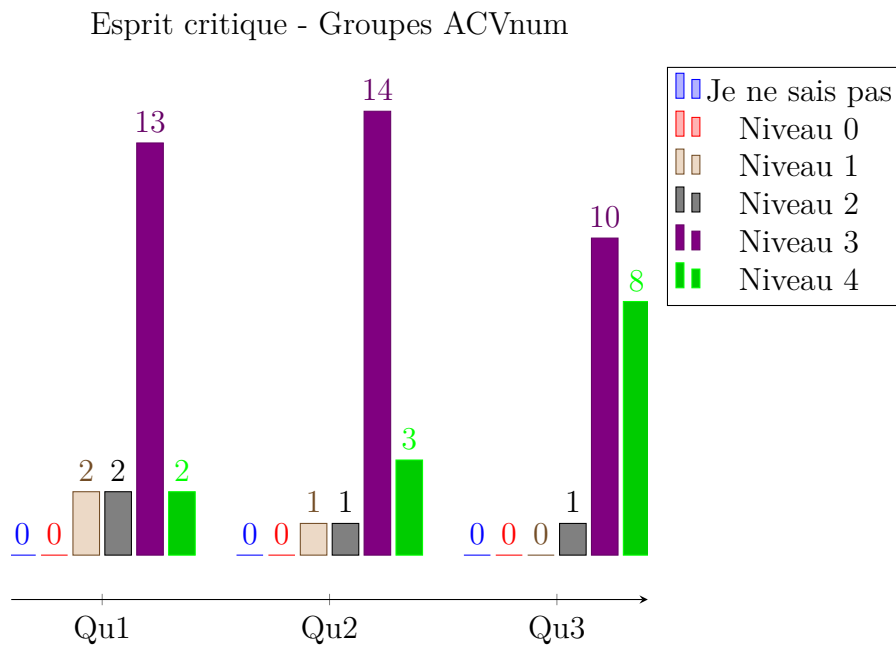


FIGURE 9.3 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Esprit Critique"

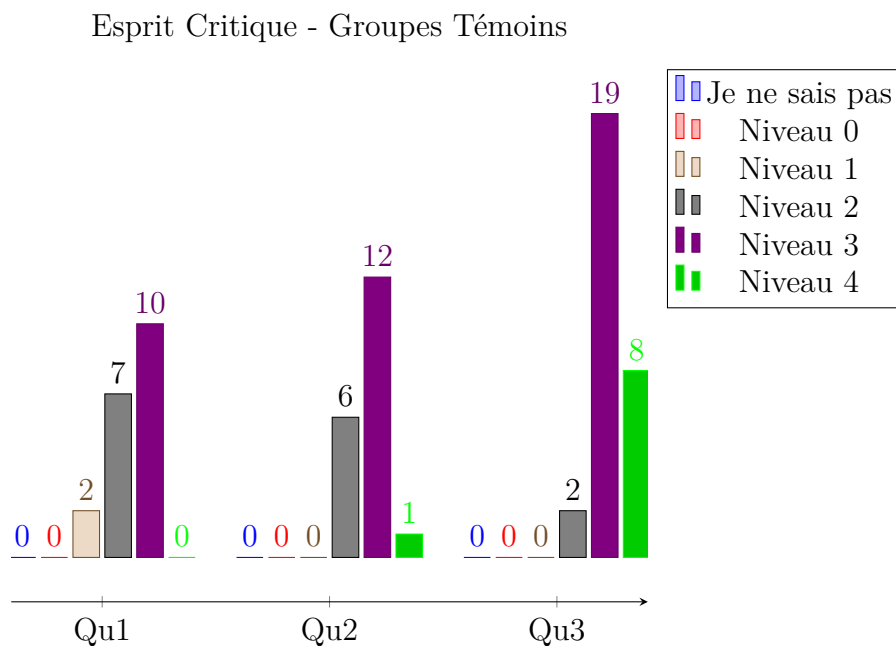


FIGURE 9.4 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Esprit Critique"

Compétence Normative - Groupes ACVnum

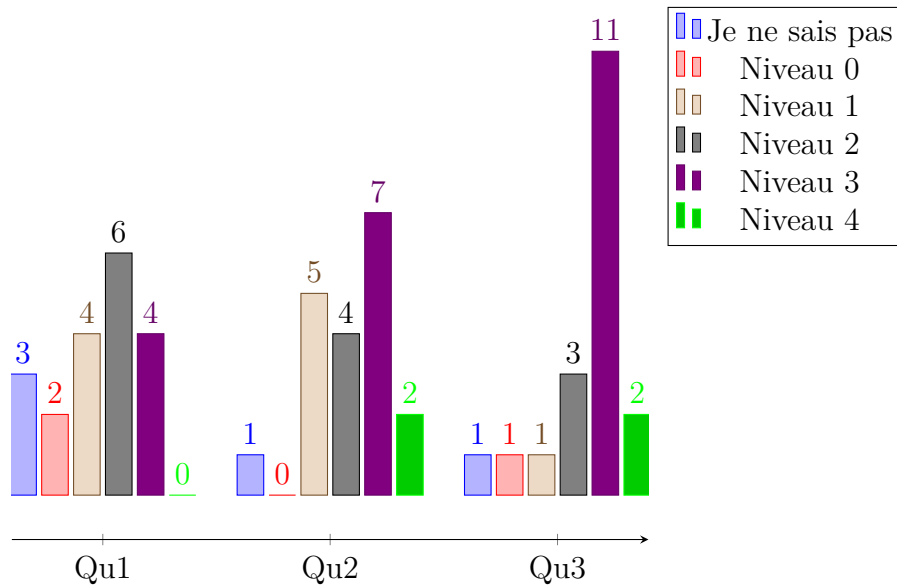


FIGURE 9.5 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Compétence Normative"

Compétence Normative - Groupes Témoins

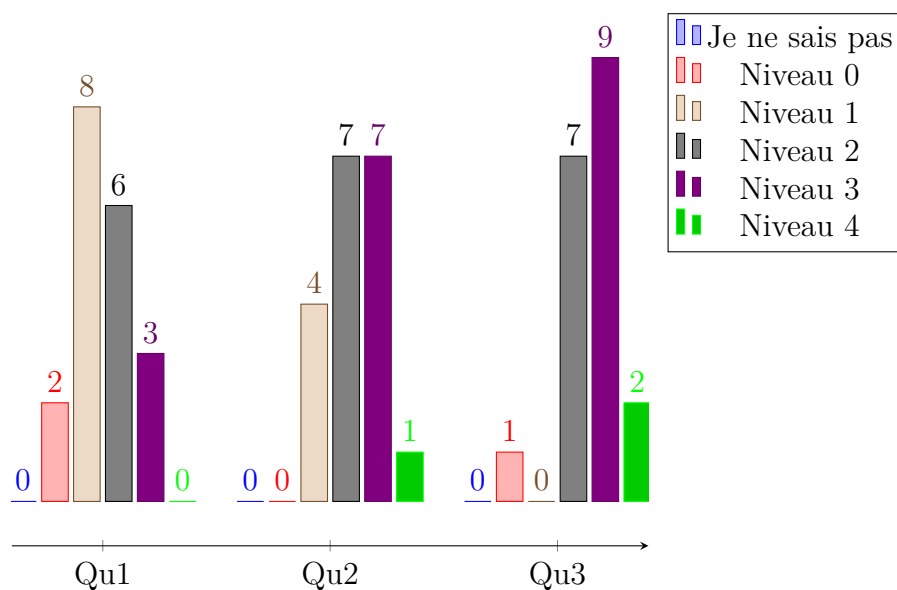


FIGURE 9.6 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Compétence Normative"

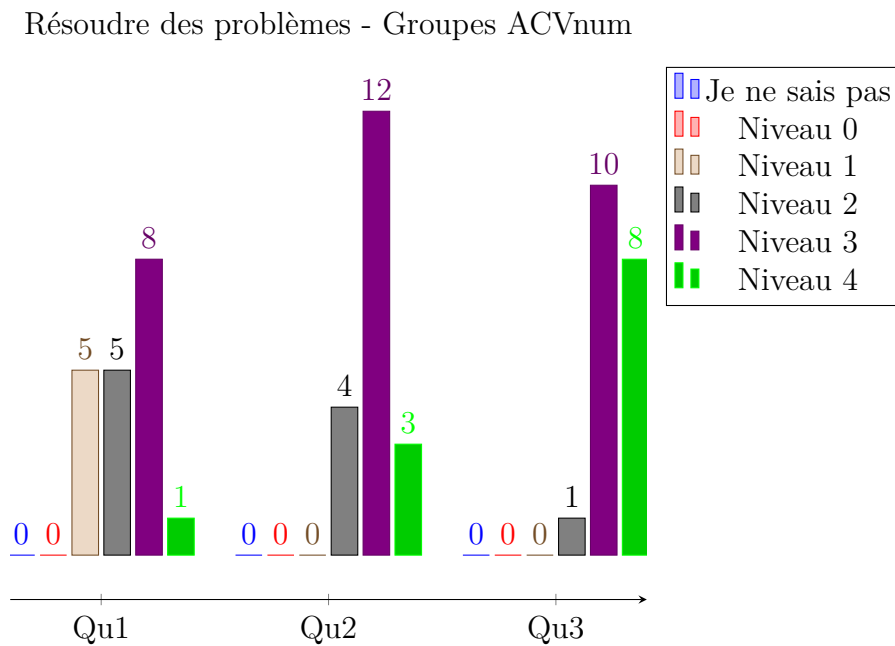


FIGURE 9.7 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Résoudre des problèmes"

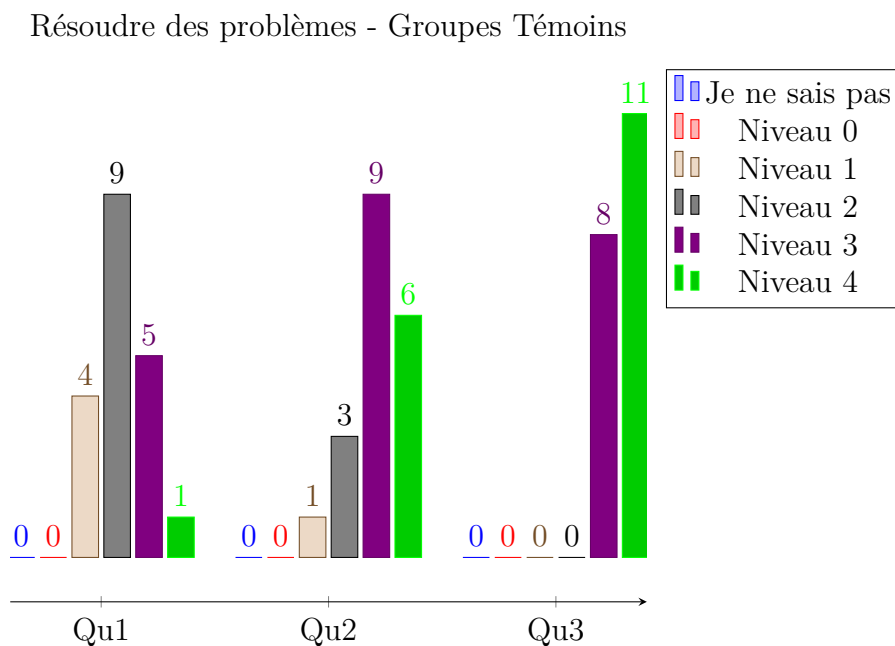


FIGURE 9.8 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Résoudre des problèmes"

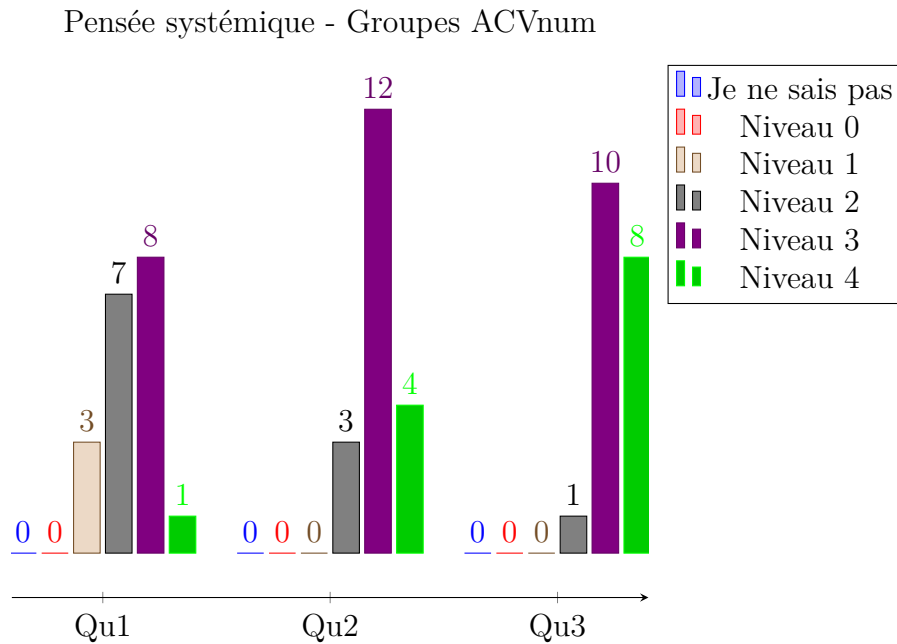


FIGURE 9.9 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Pensée systémique"

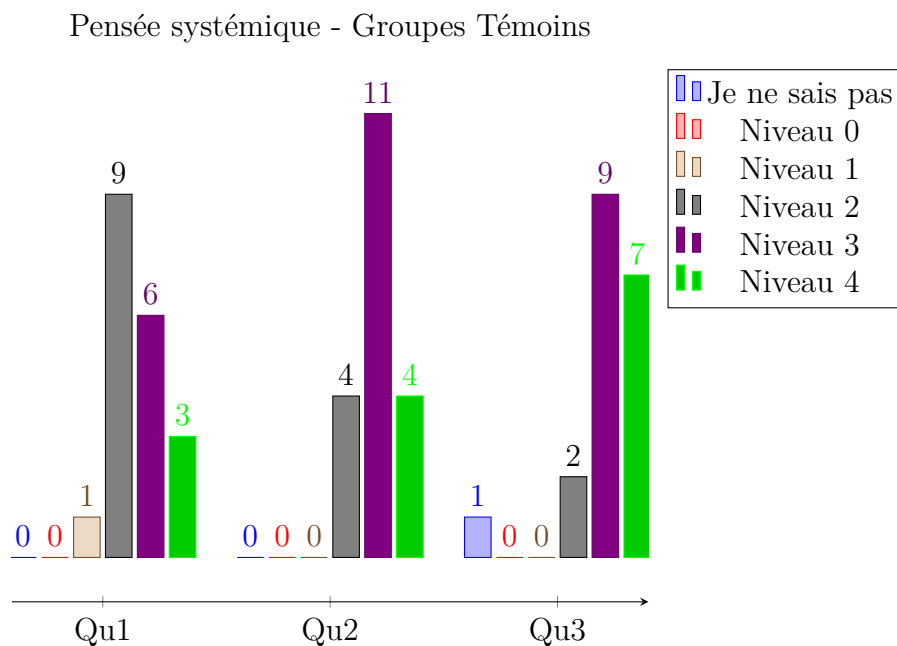


FIGURE 9.10 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Pensée systémique"

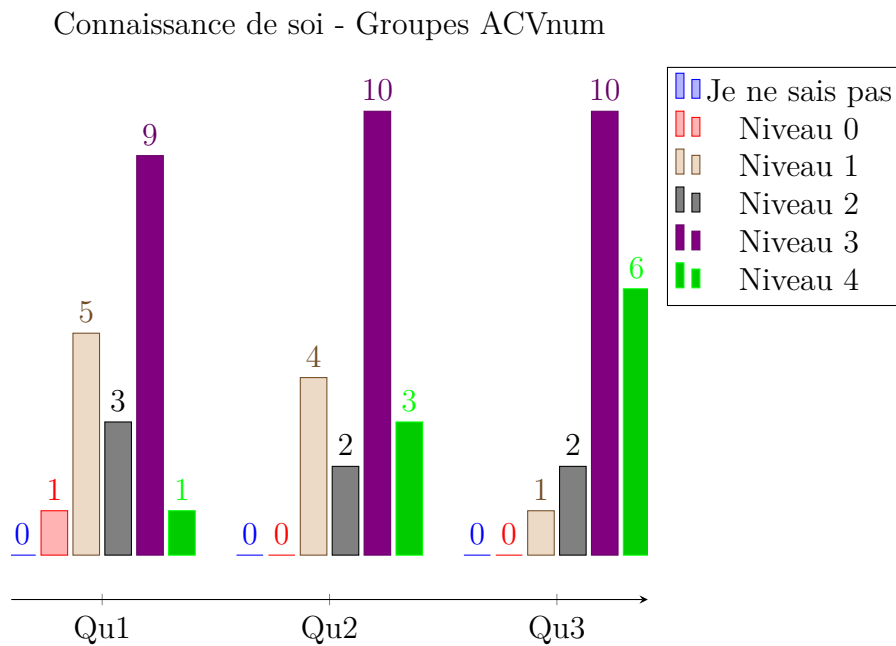


FIGURE 9.11 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Connaissance de soi"

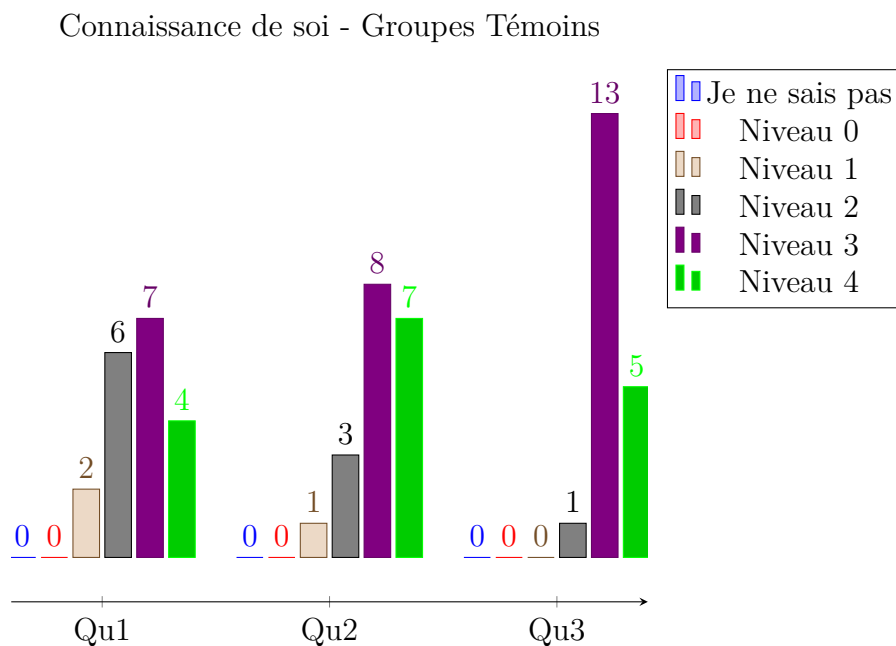


FIGURE 9.12 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Connaissance de soi"

Contextualisation et vision du futur - Groupes ACVnum

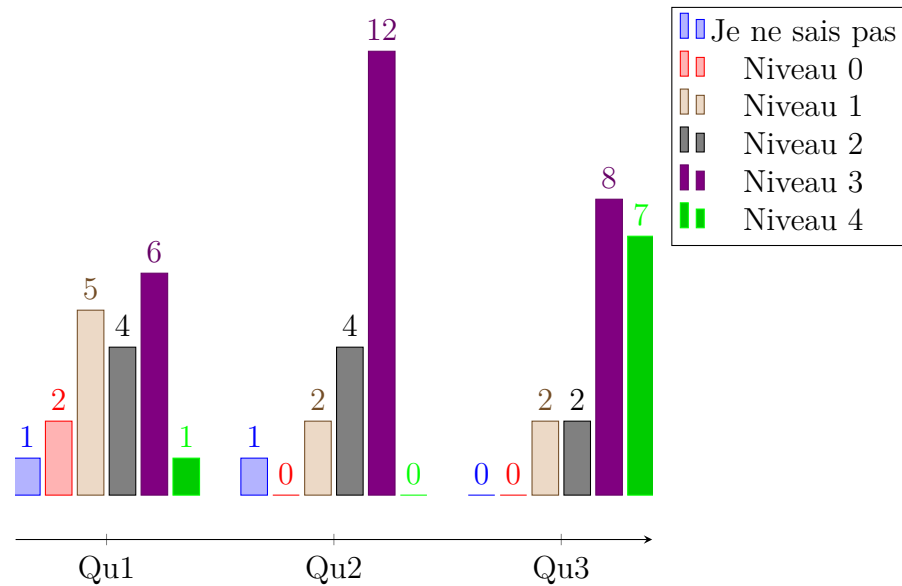


FIGURE 9.13 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Contextualisation et vision du futur"

Contextualisation et vision du futur - Groupes Témoins

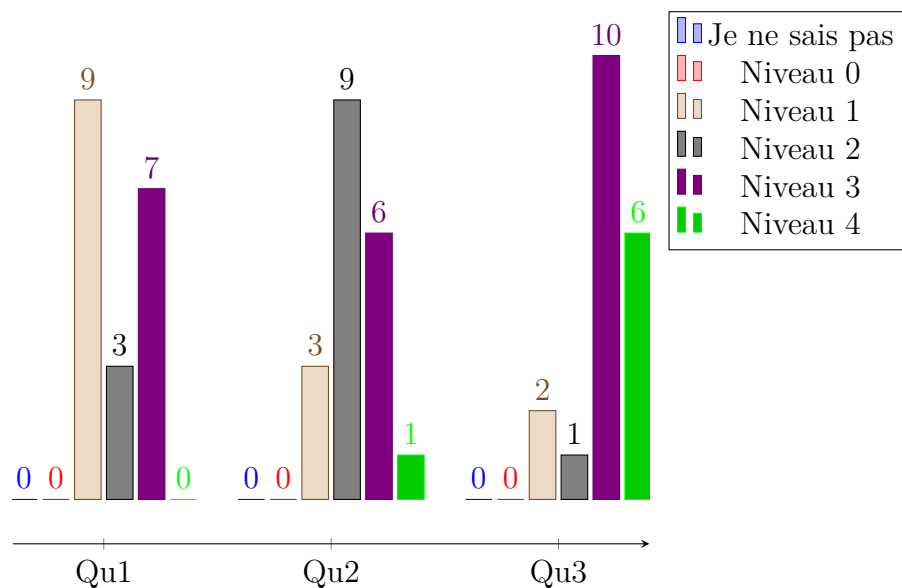


FIGURE 9.14 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Connaissance de soi"

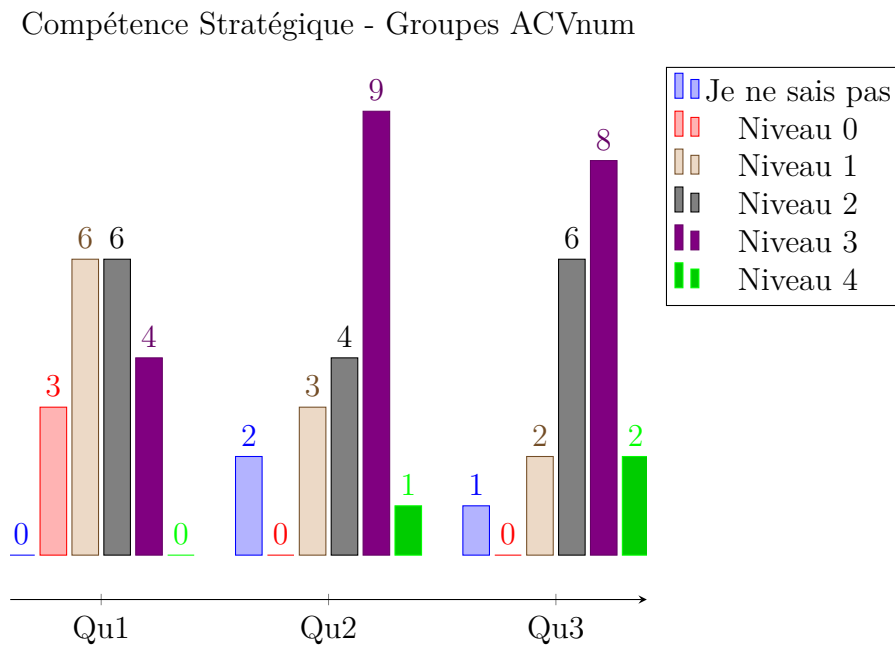


FIGURE 9.15 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes ACVnum pour la compétence "Compétence Stratégique"

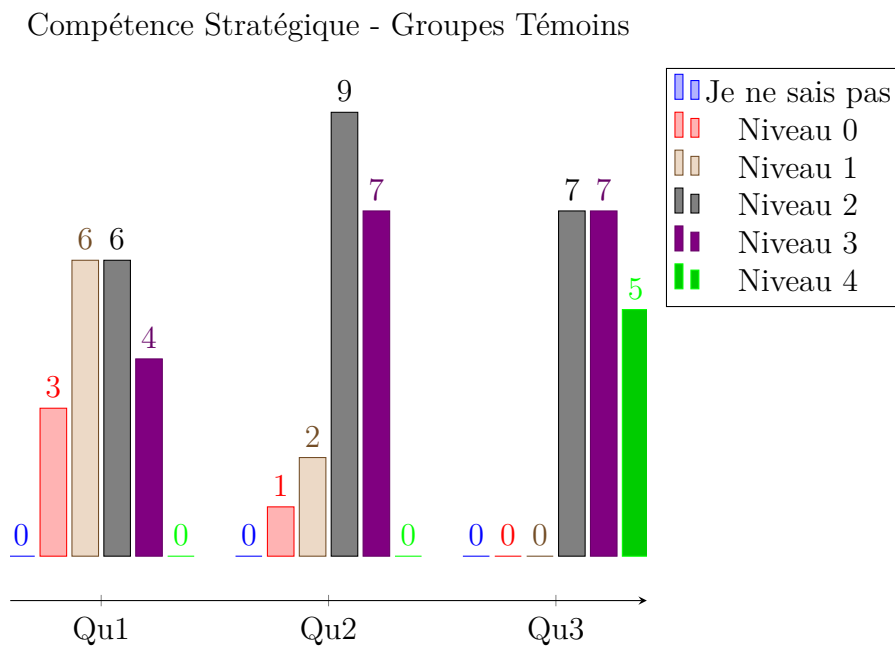


FIGURE 9.16 – Diagramme représentant la répartition des réponses des étudiants des groupes Témoins pour la compétence "Compétence Stratégique"

9.3 Annexe 3 : tests statistiques (expérimentation 1)

Cette section est composée de trois parties. La première partie concerne les tests de Wilcoxon de rangs signés, utilisés pour comprendre l'évolution des groupes avec, pendant et après la démarche ACV. La deuxième partie concerne les tests Mann-Whitney U pour la comparaison des groupes ACVnum et témoins pour chaque compétence à Qu1, Qu2 et Qu3. La troisième section reprend la significativité de tests ANOVA à mesures répétées.

9.3.1 Tests de normalité et test Wilcoxon de rangs signés pour les données quantitatives au sein de chaque groupe (classe, ACVnum, Témoin) entre Qu1, Qu2 et Qu3

Classe entière					ACVnum					Témoin				
Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test				
		Statistic		p			Statistic		p			Statistic		p
Q1_Interdisciplinarity	Q2_Interdisciplinarity	Wilcoxon W	40.50 ^a	0.067	Q1_Interdisciplinarity	Q2_Interdisciplinarity	Wilcoxon W	14.0 ^a	1.000	Q1_Interdisciplinarity	Q2_Interdisciplinarity	Wilcoxon W	3.50 ^a	0.071
Q2_Interdisciplinarity	Q3_Interdisciplinarity	Wilcoxon W	6.50 ^b	0.003	Q2_Interdisciplinarity	Q3_Interdisciplinarity	Wilcoxon W	0.0 ^a	0.011	Q2_Interdisciplinarity	Q3_Interdisciplinarity	Wilcoxon W	0.00 ^b	0.003
Q1_Interdisciplinarity		Wilcoxon W	16.00 ^d	<.001	Q1_Interdisciplinarity		Wilcoxon W	10.0 ^b	0.059	Q1_Interdisciplinarity		Wilcoxon W	0.00 ^d	<.001
^a 21 pair(s) of values were tied					^a 12 pair(s) of values were tied					^a 12 pair(s) of values were tied				
^b 25 pair(s) of values were tied					^b 9 pair(s) of values were tied					^b 9 pair(s) of values were tied				
^d 18 pair(s) of values were tied										^d 4 pair(s) of values were tied				
Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)				
		W	p				W	p				W	p	
Q1_Interdisciplinarity	- Q2_Interdisciplinarity	0.831	<.001		Q1_Interdisciplinarity	- Q2_Interdisciplinarity	0.787	<.001		Q1_Interdisciplinarity	- Q2_Interdisciplinarity	0.783	<.001	
Q2_Interdisciplinarity	- Q3_Interdisciplinarity	0.720	<.001		Q2_Interdisciplinarity	- Q3_Interdisciplinarity	0.616	<.001		Q2_Interdisciplinarity	- Q3_Interdisciplinarity	0.745	<.001	
Q1_Interdisciplinarity	- Q3_Interdisciplinarity	0.844	<.001		Q1_Interdisciplinarity	- Q3_Interdisciplinarity	0.862	0.011		Q1_Interdisciplinarity	- Q3_Interdisciplinarity	0.740	<.001	
Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality					Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality					Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality				

FIGURE 9.17 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la compétence Travail dans un groupe interdisciplinaire concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

Classe entière					ACVnum					Témoin				
Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test				
		Statistic		p			Statistic		p			Statistic		p
Q1_CriticalThinking	Q2_CriticalThinking	Wilcoxon W	19.5 ^a	0.028	Q1_CriticalThinking	Q2_CriticalThinking	Wilcoxon W	7.00 ^a	0.240	Q1_CriticalThinking	Q2_CriticalThinking	Wilcoxon W	3.50 ^a	0.071
Q2_CriticalThinking	Q3_CriticalThinking	Wilcoxon W	0.0 ^b	<.001	Q2_CriticalThinking	Q3_CriticalThinking	Wilcoxon W	0.00 ^a	0.011	Q2_CriticalThinking	Q3_CriticalThinking	Wilcoxon W	0.00 ^b	0.003
Q1_CriticalThinking		Wilcoxon W	12.5 ^d	<.001	Q1_CriticalThinking		Wilcoxon W	6.00 ^b	0.005	Q1_CriticalThinking		Wilcoxon W	0.00 ^d	<.001
^a 24 pair(s) of values were tied					^a 12 pair(s) of values were tied					^a 12 pair(s) of values were tied				
^b 21 pair(s) of values were tied					^b 7 pair(s) of values were tied					^b 9 pair(s) of values were tied				
^d 11 pair(s) of values were tied										^d 4 pair(s) of values were tied				
Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)				
		W	p				W	p				W	p	
Q1_CriticalThinking	- Q2_CriticalThinking	0.785	<.001		Q1_CriticalThinking	- Q2_CriticalThinking	0.805	0.001		Q1_CriticalThinking	- Q2_CriticalThinking	0.783	<.001	
Q2_CriticalThinking	- Q3_CriticalThinking	0.695	<.001		Q2_CriticalThinking	- Q3_CriticalThinking	0.616	<.001		Q2_CriticalThinking	- Q3_CriticalThinking	0.745	<.001	
Q1_CriticalThinking	- Q3_CriticalThinking	0.793	<.001		Q1_CriticalThinking	- Q3_CriticalThinking	0.828	0.003		Q1_CriticalThinking	- Q3_CriticalThinking	0.740	<.001	
Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality					Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality					Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality				

FIGURE 9.18 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la compétence Esprit Critique concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

Chapitre 9. Annexes

Classe entière				ACVnum				Témoïn						
Paired Samples T-Test				Paired Samples T-Test				Paired Samples T-Test						
		Statistic	p			Statistic	p			Statistic	p			
Q1_NormativeCompetence	Q2_NormativeCompetence	Wilcoxon W	32.0 ^a	<.001	Q1_NormativeCompetence	Q2_NormativeCompetence	Wilcoxon W	11.5 ^a	0.032	Q1_NormativeCompetence	Q2_NormativeCompetence	Wilcoxon W	7.50 ^a	0.001
Q2_NormativeCompetence	Q3_NormativeCompetence	Wilcoxon W	71.0 ^b	0.036	Q2_NormativeCompetence	Q3_NormativeCompetence	Wilcoxon W	16.0 ^b	0.138	Q2_NormativeCompetence	Q3_NormativeCompetence	Wilcoxon W	22.50 ^b	0.179
Q1_NormativeCompetence		Wilcoxon W	25.0 ^c	<.001	Q1_NormativeCompetence		Wilcoxon W	0.0 ^d	<.001	Q1_NormativeCompetence		Wilcoxon W	12.00 ^d	0.002
^a 11 pair(s) of values were tied				^a 7 pair(s) of values were tied				^a 4 pair(s) of values were tied						
^b 15 pair(s) of values were tied				^b 8 pair(s) of values were tied				^b 7 pair(s) of values were tied						
^c 6 pair(s) of values were tied				^c 4 pair(s) of values were tied				^c 2 pair(s) of values were tied						
Normality Test (Shapiro-Wilk)				Normality Test (Shapiro-Wilk)				Normality Test (Shapiro-Wilk)						
		W	p			W	p			W	p			
Q1_NormativeCompetence	- Q2_NormativeCompetence	0.854	<.001	Q1_NormativeCompetence	- Q2_NormativeCompetence	0.871	0.015	Q1_NormativeCompetence	- Q2_NormativeCompetence	0.744	<.001			
Q2_NormativeCompetence	- Q3_NormativeCompetence	0.850	<.001	Q2_NormativeCompetence	- Q3_NormativeCompetence	0.813	0.002	Q2_NormativeCompetence	- Q3_NormativeCompetence	0.879	0.021			
Q1_NormativeCompetence	- Q3_NormativeCompetence	0.891	0.001	Q1_NormativeCompetence	- Q3_NormativeCompetence	0.840	0.005	Q1_NormativeCompetence	- Q3_NormativeCompetence	0.891	0.033			

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.19 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la Compétence Normative concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

Classe entière				ACVnum				Témoïn						
Paired Samples T-Test				Paired Samples T-Test				Paired Samples T-Test						
		Statistic	p			Statistic	p			Statistic	p			
Q1_AbilityProblems	Q2_AbilityProblems	Wilcoxon W	20.0 ^a	<.001	Q1_AbilityProblems	Q2_AbilityProblems	Wilcoxon W	6.00 ^a	0.003	Q1_AbilityProblems	Q2_AbilityProblems	Wilcoxon W	4.50 ^a	0.004
Q2_AbilityProblems	Q3_AbilityProblems	Wilcoxon W	18.0 ^b	<.001	Q2_AbilityProblems	Q3_AbilityProblems	Wilcoxon W	0.00 ^b	0.006	Q2_AbilityProblems	Q3_AbilityProblems	Wilcoxon W	10.00 ^b	0.033
Q1_AbilityProblems		Wilcoxon W	0.0 ^d	<.001	Q1_AbilityProblems		Wilcoxon W	0.00 ^d	<.001	Q1_AbilityProblems		Wilcoxon W	0.00 ^d	<.001
^a 12 pair(s) of values were tied				^a 6 pair(s) of values were tied				^a 6 pair(s) of values were tied						
^b 19 pair(s) of values were tied				^b 11 pair(s) of values were tied				^b 8 pair(s) of values were tied						
^c 6 pair(s) of values were tied				^c 3 pair(s) of values were tied				^c 3 pair(s) of values were tied						
Normality Test (Shapiro-Wilk)				Normality Test (Shapiro-Wilk)				Normality Test (Shapiro-Wilk)						
		W	p			W	p			W	p			
Q1_AbilityProblems	- Q2_AbilityProblems	0.892	0.001	Q1_AbilityProblems	- Q2_AbilityProblems	0.853	0.007	Q1_AbilityProblems	- Q2_AbilityProblems	0.918	0.105			
Q2_AbilityProblems	- Q3_AbilityProblems	0.808	<.001	Q2_AbilityProblems	- Q3_AbilityProblems	0.633	<.001	Q2_AbilityProblems	- Q3_AbilityProblems	0.877	0.019			
Q1_AbilityProblems	- Q3_AbilityProblems	0.786	<.001	Q1_AbilityProblems	- Q3_AbilityProblems	0.796	<.001	Q1_AbilityProblems	- Q3_AbilityProblems	0.722	<.001			

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.20 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la Résoudre des problèmes concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

Classe entière				ACVnum				Témoïn						
Paired Samples T-Test				Paired Samples T-Test				Paired Samples T-Test						
		Statistic	p			Statistic	p			Statistic	p			
Q1_SystemicThinking	Q2_SystemicThinking	Wilcoxon W	30.0 ^a	<.001	Q1_SystemicThinking	Q2_SystemicThinking	Wilcoxon W	4.00 ^a	0.009	Q1_SystemicThinking	Q2_SystemicThinking	Wilcoxon W	13.00 ^a	0.024
Q2_SystemicThinking	Q3_SystemicThinking	Wilcoxon W	24.0 ^b	0.016	Q2_SystemicThinking	Q3_SystemicThinking	Wilcoxon W	4.50 ^b	0.041	Q2_SystemicThinking	Q3_SystemicThinking	Wilcoxon W	8.00 ^b	0.172
Q1_SystemicThinking		Wilcoxon W	17.0 ^d	<.001	Q1_SystemicThinking		Wilcoxon W	0.00 ^d	0.002	Q1_SystemicThinking		Wilcoxon W	12.00 ^d	0.008
^a 15 pair(s) of values were tied				^a 8 pair(s) of values were tied				^a 7 pair(s) of values were tied						
^b 22 pair(s) of values were tied				^b 11 pair(s) of values were tied				^b 11 pair(s) of values were tied						
^c 12 pair(s) of values were tied				^c 7 pair(s) of values were tied				^c 5 pair(s) of values were tied						
Normality Test (Shapiro-Wilk)				Normality Test (Shapiro-Wilk)				Normality Test (Shapiro-Wilk)						
		W	p			W	p			W	p			
Q1_SystemicThinking	- Q2_SystemicThinking	0.864	<.001	Q1_SystemicThinking	- Q2_SystemicThinking	0.863	0.011	Q1_SystemicThinking	- Q2_SystemicThinking	0.751	<.001			
Q2_SystemicThinking	- Q3_SystemicThinking	0.813	<.001	Q2_SystemicThinking	- Q3_SystemicThinking	0.744	<.001	Q2_SystemicThinking	- Q3_SystemicThinking	0.814	0.002			
Q1_SystemicThinking	- Q3_SystemicThinking	0.905	0.004	Q1_SystemicThinking	- Q3_SystemicThinking	0.778	<.001	Q1_SystemicThinking	- Q3_SystemicThinking	0.888	0.030			

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.21 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la Pensée systémique concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

9.3. Annexe 3 : tests statistiques (expérimentation 1)

Classe entière					ACVnum					Témoins				
Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test				
			Statistic	p				Statistic	p				Statistic	p
Q1_SelfKnowledge	Q2_SelfKnowledge	Wilcoxon W	52.50 ^a	0.005	Q1_SelfKnowledge	Q2_SelfKnowledge	Wilcoxon W	9.00 ^a	0.052	Q1_SelfKnowledge	Q2_SelfKnowledge	Wilcoxon W	19.50 ^a	0.050
Q2_SelfKnowledge	Q3_SelfKnowledge	Wilcoxon W	87.00 ^a	0.103	Q2_SelfKnowledge	Q3_SelfKnowledge	Wilcoxon W	28.50 ^b	0.123	Q2_SelfKnowledge	Q3_SelfKnowledge	Wilcoxon W	18.00 ^b	0.608
Q1_SelfKnowledge		Wilcoxon W	8.00 ^b	<.001	Q1_SelfKnowledge		Wilcoxon W	0.00 ^d	0.003	Q1_SelfKnowledge		Wilcoxon W	4.50 ^d	0.015

^a 15 pair(s) of values were tied
^b 17 pair(s) of values were tied

^a 9 pair(s) of values were tied
^b 5 pair(s) of values were tied
^d 8 pair(s) of values were tied

^a 6 pair(s) of values were tied
^b 10 pair(s) of values were tied
^d 9 pair(s) of values were tied

Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p				W	p				W	p
Q1_SelfKnowledge	- Q2_SelfKnowledge		0.869	<.001	Q1_SelfKnowledge	- Q2_SelfKnowledge		0.873	0.016	Q1_SelfKnowledge	- Q2_SelfKnowledge		0.853	0.008
Q2_SelfKnowledge	- Q3_SelfKnowledge		0.920	0.010	Q2_SelfKnowledge	- Q3_SelfKnowledge		0.946	0.335	Q2_SelfKnowledge	- Q3_SelfKnowledge		0.856	0.008
Q1_SelfKnowledge	- Q3_SelfKnowledge		0.818	<.001	Q1_SelfKnowledge	- Q3_SelfKnowledge		0.784	<.001	Q1_SelfKnowledge	- Q3_SelfKnowledge		0.854	0.008

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.22 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la Connaissance de soi concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

Classe entière					ACVnum					Témoins				
Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test				
			Statistic	p				Statistic	p				Statistic	p
Q1_Contextualisation	Q2_Contextualisation	Wilcoxon W	69.0 ^a	0.018	Q1_Contextualisation	Q2_Contextualisation	Wilcoxon W	11.00 ^a	0.054	Q1_Contextualisation	Q2_Contextualisation	Wilcoxon W	28.00 ^a	0.210
Q2_Contextualisation	Q3_Contextualisation	Wilcoxon W	30.0 ^a	<.001	Q2_Contextualisation	Q3_Contextualisation	Wilcoxon W	12.00 ^b	0.029	Q2_Contextualisation	Q3_Contextualisation	Wilcoxon W	4.50 ^b	0.006
Q1_Contextualisation		Wilcoxon W	16.0 ^b	<.001	Q1_Contextualisation		Wilcoxon W	4.00 ^c	0.002	Q1_Contextualisation		Wilcoxon W	4.50 ^d	0.001

^a 14 pair(s) of values were tied
^b 9 pair(s) of values were tied

^a 8 pair(s) of values were tied
^b 7 pair(s) of values were tied
^c 5 pair(s) of values were tied

^a 6 pair(s) of values were tied
^b 7 pair(s) of values were tied
^d 4 pair(s) of values were tied

Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p				W	p				W	p
Q1_Contextualisation	- Q2_Contextualisation		0.936	0.031	Q1_Contextualisation	- Q2_Contextualisation		0.933	0.198	Q1_Contextualisation	- Q2_Contextualisation		0.933	0.198
Q2_Contextualisation	- Q3_Contextualisation		0.900	0.003	Q2_Contextualisation	- Q3_Contextualisation		0.898	0.045	Q2_Contextualisation	- Q3_Contextualisation		0.904	0.058
Q1_Contextualisation	- Q3_Contextualisation		0.915	0.007	Q1_Contextualisation	- Q3_Contextualisation		0.913	0.085	Q1_Contextualisation	- Q3_Contextualisation		0.928	0.162

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.23 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la Contextualisation et vision du futur (anticipation) concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

Classe entière					ACVnum					Témoins				
Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test					Paired Samples T-Test				
			Statistic	p				Statistic	p				Statistic	p
Q1_StrategicCompetence	Q2_StrategicCompetence	Wilcoxon W	21.0 ^a	<.001	Q1_StrategicCompetence	Q2_StrategicCompetence	Wilcoxon W	1.00 ^a	0.003	Q1_StrategicCompetence	Q2_StrategicCompetence	Wilcoxon W	12.00 ^a	0.013
Q2_StrategicCompetence	Q3_StrategicCompetence	Wilcoxon W	89.0 ^a	0.024	Q2_StrategicCompetence	Q3_StrategicCompetence	Wilcoxon W	28.50 ^b	0.717	Q2_StrategicCompetence	Q3_StrategicCompetence	Wilcoxon W	18.00 ^b	0.013
Q1_StrategicCompetence		Wilcoxon W	29.5 ^b	<.001	Q1_StrategicCompetence		Wilcoxon W	15.00 ^d	0.003	Q1_StrategicCompetence		Wilcoxon W	3.50 ^d	<.001

^a 12 pair(s) of values were tied
^b 5 pair(s) of values were tied

^a 7 pair(s) of values were tied
^b 8 pair(s) of values were tied
^d 2 pair(s) of values were tied

^a 6 pair(s) of values were tied
^b 4 pair(s) of values were tied
^d 3 pair(s) of values were tied

Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)					Normality Test (Shapiro-Wilk)				
			W	p				W	p				W	p
Q1_StrategicCompetence	- Q2_StrategicCompetence		0.910	0.006	Q1_StrategicCompetence	- Q2_StrategicCompetence		0.888	0.030	Q1_StrategicCompetence	- Q2_StrategicCompetence		0.873	0.016
Q2_StrategicCompetence	- Q3_StrategicCompetence		0.929	0.019	Q2_StrategicCompetence	- Q3_StrategicCompetence		0.906	0.062	Q2_StrategicCompetence	- Q3_StrategicCompetence		0.916	0.095
Q1_StrategicCompetence	- Q3_StrategicCompetence		0.910	0.006	Q1_StrategicCompetence	- Q3_StrategicCompetence		0.910	0.074	Q1_StrategicCompetence	- Q3_StrategicCompetence		0.870	0.015

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.24 – Test de normalité et test *Wilcoxon-signed rank* pour la Compétence Stratégique concernant les données sur (a) classe entière, (b) les groupes ACVnum uniquement et(c) les groupes témoins uniquement

9.3.2 Tests de normalité et test Mann-Whitney U pour les données quantitatives entre les groupes ACVnum et groupes témoins

Le test Mann-Whitney U (également appelé test de *Wilcoxon rank-sum*), est un test non paramétrique utilisé pour déterminer si deux échantillons indépendants proviennent de la même population. Il est utilisé lorsque l'hypothèse de normalité de la population sous-jacente n'est pas respectée (ce qui est notre cas). Le test compare les médianes des deux échantillons.

Le test a été utilisé pour comparer les groupes ACVnum et témoins.

Test Mann-Withney pour comparer les groupes ACVnum et Témoins

Normality Test (Shapiro-Wilk)			Independent Samples T-Test			
	W	p			Statistic	p
Q1_interdisciplinarity	0.889	0.001	Q1_interdisciplinarity	Mann-Whitney U	135	0.115
Q2_interdisciplinarity	0.774	<.001	Q2_interdisciplinarity	Mann-Whitney U	173	0.808
Q3_interdisciplinarity	0.761	<.001	Q3_interdisciplinarity	Mann-Whitney U	159	0.466
Q1_criticalThinking	0.879	<.001	Q1_criticalThinking	Mann-Whitney U	128	0.082
Q2_criticalThinking	0.865	<.001	Q2_criticalThinking	Mann-Whitney U	135	0.105
Q3_criticalThinking	0.788	<.001	Q3_criticalThinking	Mann-Whitney U	175	0.870
Q1_NormativeCompetence	0.943	0.052	Q1_NormativeCompetence	Mann-Whitney U	157	0.486
Q2_NormativeCompetence	0.890	0.001	Q2_NormativeCompetence	Mann-Whitney U	172	0.795
Q3_NormativeCompetence	0.836	<.001	Q3_NormativeCompetence	Mann-Whitney U	165	0.620
Q1_AbilityProblems	0.895	0.002	Q1_AbilityProblems	Mann-Whitney U	166	0.666
Q2_AbilityProblems	0.868	<.001	Q2_AbilityProblems	Mann-Whitney U	160	0.517
Q3_AbilityProblems	0.827	<.001	Q3_AbilityProblems	Mann-Whitney U	148	0.287
Q1_SystemicThinking	0.927	0.016	Q1_SystemicThinking	Mann-Whitney U	162	0.563
Q2_SystemicThinking	0.811	<.001	Q2_SystemicThinking	Mann-Whitney U	173	0.815
Q3_SystemicThinking	0.819	<.001	Q3_SystemicThinking	Mann-Whitney U	171	0.771
Q1_SelfKnowledge	0.946	0.064	Q1_SelfKnowledge	Mann-Whitney U	141	0.225
Q2_SelfKnowledge	0.917	0.008	Q2_SelfKnowledge	Mann-Whitney U	134	0.146
Q3_SelfKnowledge	0.819	<.001	Q3_SelfKnowledge	Mann-Whitney U	175	0.866
Q1_Contextualisation	0.878	<.001	Q1_Contextualisation	Mann-Whitney U	176	0.890
Q2_Contextualisation	0.915	0.007	Q2_Contextualisation	Mann-Whitney U	136	0.164
Q3_Contextualisation	0.795	<.001	Q3_Contextualisation	Mann-Whitney U	178	0.950
Q1_StrategicCompetence	0.880	<.001	Q1_StrategicCompetence	Mann-Whitney U	181	1.000
Q2_StrategicCompetence	0.920	0.010	Q2_StrategicCompetence	Mann-Whitney U	143	0.244
Q3_StrategicCompetence	0.943	0.053	Q3_StrategicCompetence	Mann-Whitney U	145	0.279

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.25 – Test de normalité et test *Mann-Whitney U* pour comparaison des groupes ACVnum et témoins (Qu1, Qu2, Qu3 pour toutes les compétences)

Le test a également été utilisé pour comparer les groupes en fonction du genre (résultats non exploités dans l'analyse).

9.3. Annexe 3 : tests statistiques (expérimentation 1)

Test Mann-Whitney pour comparer les réponses en fonction du genre

Independent Samples T-Test						Normality Test (Shapiro-Wilk)		
		Statistic	p		Effect Size		W	p
Q1_interdisciplinarity	Mann-Whitney U	161.5	0.566	Rank biserial correlation	0.0952	Q1_interdisciplinarity	0.794	<.001
Q2_interdisciplinarity	Mann-Whitney U	153.0	0.383	Rank biserial correlation	0.1429	Q2_interdisciplinarity	0.868	<.001
Q3_interdisciplinarity	Mann-Whitney U	169.5	0.767	Rank biserial correlation	0.0504	Q3_interdisciplinarity	0.733	<.001
Q1_criticalThinking	Mann-Whitney U	140.0	0.202	Rank biserial correlation	0.2157	Q1_criticalThinking	0.877	<.001
Q2_criticalThinking	Mann-Whitney U	147.5	0.275	Rank biserial correlation	0.1737	Q2_criticalThinking	0.871	<.001
Q3_criticalThinking	Mann-Whitney U	114.0	0.036	Rank biserial correlation	0.3613	Q3_criticalThinking	0.914	0.006
Q1_NormativeCompetence	Mann-Whitney U	144.5	0.308	Rank biserial correlation	0.1905	Q1_NormativeCompetence	0.935	0.028
Q2_NormativeCompetence	Mann-Whitney U	153.5	0.451	Rank biserial correlation	0.1401	Q2_NormativeCompetence	0.917	0.008
Q3_NormativeCompetence	Mann-Whitney U	144.5	0.282	Rank biserial correlation	0.1905	Q3_NormativeCompetence	0.866	<.001
Q1_AbilityProblems	Mann-Whitney U	133.0	0.163	Rank biserial correlation	0.2549	Q1_AbilityProblems	0.930	0.020
Q2_AbilityProblems	Mann-Whitney U	144.0	0.268	Rank biserial correlation	0.1933	Q2_AbilityProblems	0.898	0.002
Q3_AbilityProblems	Mann-Whitney U	91.0	0.004	Rank biserial correlation	0.4902	Q3_AbilityProblems	0.901	0.003
Q1_SystemicThinking	Mann-Whitney U	173.5	0.888	Rank biserial correlation	0.0280	Q1_SystemicThinking	0.901	0.003
Q2_SystemicThinking	Mann-Whitney U	171.5	0.827	Rank biserial correlation	0.0392	Q2_SystemicThinking	0.808	<.001
Q3_SystemicThinking	Mann-Whitney U	145.0	0.283	Rank biserial correlation	0.1877	Q3_SystemicThinking	0.883	<.001
Q1_SelfKnowledge	Mann-Whitney U	115.5	0.054	Rank biserial correlation	0.3529	Q1_SelfKnowledge	0.957	0.151
Q2_SelfKnowledge	Mann-Whitney U	148.0	0.345	Rank biserial correlation	0.1709	Q2_SelfKnowledge	0.912	0.006
Q3_SelfKnowledge	Mann-Whitney U	119.0	0.046	Rank biserial correlation	0.3333	Q3_SelfKnowledge	0.919	0.009
Q1_Contextualisation	Mann-Whitney U	90.5	0.007	Rank biserial correlation	0.4930	Q1_Contextualisation	0.899	0.002
Q2_Contextualisation	Mann-Whitney U	133.5	0.157	Rank biserial correlation	0.2521	Q2_Contextualisation	0.923	0.012
Q3_Contextualisation	Mann-Whitney U	161.0	0.589	Rank biserial correlation	0.0980	Q3_Contextualisation	0.860	<.001
Q1_StrategicCompetence	Mann-Whitney U	163.5	0.658	Rank biserial correlation	0.0840	Q1_StrategicCompetence	0.905	0.003
Q2_StrategicCompetence	Mann-Whitney U	153.0	0.435	Rank biserial correlation	0.1429	Q2_StrategicCompetence	0.903	0.003
Q3_StrategicCompetence	Mann-Whitney U	148.0	0.351	Rank biserial correlation	0.1709	Q3_StrategicCompetence	0.939	0.038

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

FIGURE 9.26 – Test de normalité et test *Mann-Whitney U* pour comparaison en fonction des genres (pour Qu1, Qu2, Qu3 pour toutes les compétences)

9.4 Annexe 4 : représentation graphique de l'éco-hameau étudié (expérimentation 2)

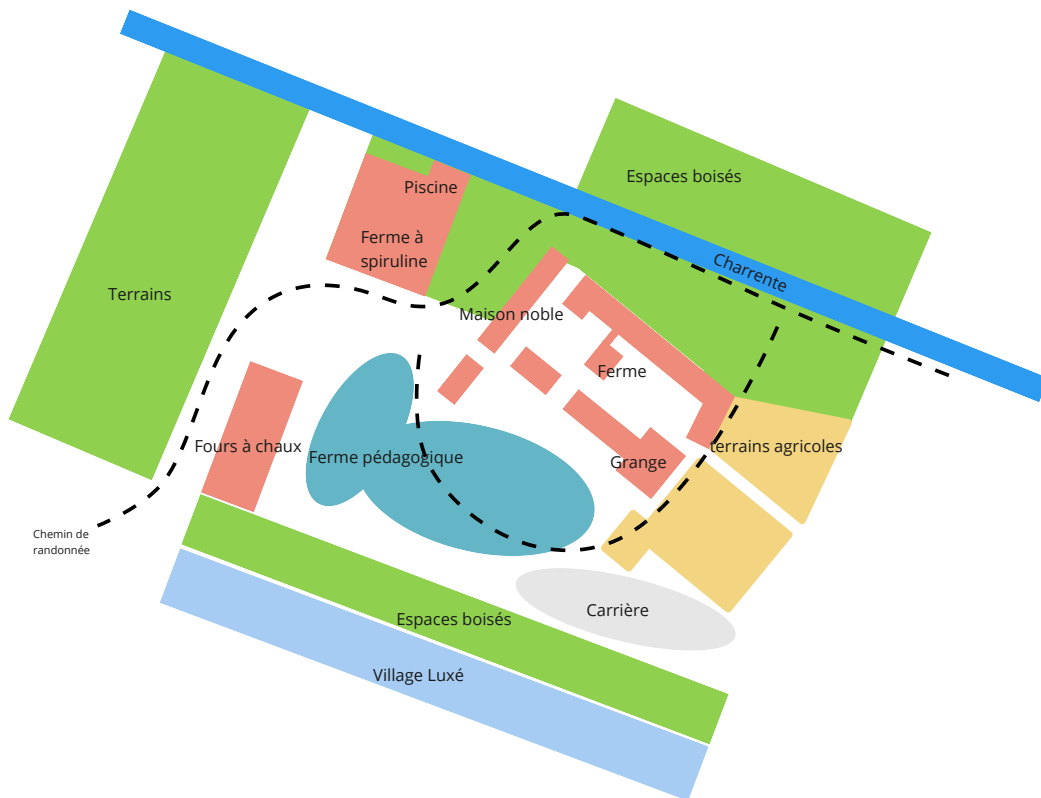


FIGURE 9.27 – Schéma de l'éco-hameau étudié