



L'intégration des enjeux de développement durable dans la formation des ingénieurs : une approche par les systèmes complexes

Une revue de littérature et une application en grille d'analyse pour outils opérationnels d'intégration

Rapport de Travail de Fin d'Etudes

François PIRSON
MAB2 – Mécanique – Génie Energétique

Le 04 juin 2022



Sous la direction de :
Prof. Sébastien BETTE (promoteur)
Loann ASTORINO (co-promoteur)

Si le seul outil que vous avez est un marteau, vous verrez tout problème comme un clou.

- *Abraham Maslow*

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon promoteur, Monsieur Sébastien Bette, pour son implication, son ouverture, sa pertinence et son authenticité.

Mes remerciements s'adressent également à Loann Astorino, doctorant à la Faculté, pour son dévouement, son pragmatisme et son optimisme.

Je tiens également à remercier Stéphane Moyson pour ses explications, son intérêt et ses conseils encourageants.

Je remercie chaleureusement Philippe Bihouix, Arthur Keller et Jean-Marc Jancovici pour m'avoir ouvert les yeux sur de vrais problèmes d'ingénieur, et pour représenter un autre type d'idéal et de récit que celui dans lequel je ne me retrouve plus depuis déjà longtemps.

Enfin, je remercie mes amis et ma famille pour leur soutien et leur bienveillance.

Résumé

Les préoccupations pour les enjeux de développement émergent progressivement dans les universités depuis les années 70. Un large débat public et une communauté d'intervenants se sont constitués autour de ces thématiques, et notamment pour y former les étudiants en école d'ingénieur. Ceci nous a conduit à nous intéresser aux nécessités stratégiques d'un plan d'intégration des enjeux de développement durable dans la formation des ingénieurs.

Pour cela, il a été choisi de réaliser une revue de littérature et d'en dégager une grille d'analyse pour évaluer la conformité d'un outil d'intégration de terrain avec les résultats. Les objectifs de ce travail sont donc : de collecter des résultats sur le sujet, de les interpréter, de les formaliser et d'en dégager une grille d'analyse pour évaluer la pertinence des outils d'intégration.

Pour mener la revue de littérature, diverses méthodes ont été suivies. La méthode ESQI a permis de sonder la diversité des objets de recherche liés à l'intégration, d'en dresser un état de l'art, puis de préciser la question de recherche. L'approche PRISMA a guidé la recherche et la sélection d'articles scientifiques. Enfin, la démarche PQC3 a permis de structurer la revue de littérature.

La revue a permis de mettre en lumière qu'un changement de paradigme s'avère nécessaire aux ingénieurs pour mener une intégration. En parallèle à cela, il a pu être montré que les systèmes complexes permettent de caractériser l'intégration comme d'un processus de pilotage. Ce dernier nécessite cependant de générer en amont de la complexité sociale par la création d'un système de pilotage, de davantage de liens entre parties prenantes et par un décloisonnement disciplinaire. Ces nécessités sont d'ordre quantitatives. Des réflexions pédagogiques et didactiques, l'identification de barrières et l'utilisation de leviers d'action ont également été traités, et constituent des nécessités d'ordre qualitatif.

La possibilité d'appliquer les résultats de la revue s'est concrétisée par la conception d'un outil d'analyse permettant d'évaluer la prise en compte de ces nécessités au sein d'outils opérationnels d'intégration. Pour illustrer, l'outil a été appliqué au rapport « ClimatSup INSA : Former l'ingénieur au XXIe siècle » de The Shift Project - INSA.

Mots clés :

Éducation au développement durable, Ingénierie des systèmes, Enseignement Supérieur, Complexité.

Table des matières

Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Table des matières.....	5
Liste des abréviations.....	7
Glossaire.....	7
Introduction.....	13
Partie A : Démarche.....	15
1. Contexte.....	15
2. Méthodologie et Rédaction.....	20
2.1 Exploration (état de l'art) et formalisation de la question de recherche.....	20
2.2 Recherche.....	23
2.3 Rédaction.....	28
Partie B : Revue de littérature.....	31
3. Pourquoi intégrer les enjeux de développement durable dans la formation des ingénieurs ? Pourquoi sous l'angle des systèmes complexes ?.....	31
3.1 Besoins évolutifs des entreprises.....	31
3.2 Rôle sociétal de l'ingénieur.....	32
3.3 Impact socio-environnemental de l'ingénieur.....	34
3.4 Adéquation de la démarche de l'ingénieur aux problèmes de la durabilité.....	34
3.5 Coursus de formation de l'ingénieur.....	36
4. Qu'est-ce qu'un système complexe ? Comment s'applique-t-il au système d'enseignement ?.....	38
4.1 Les systèmes complexes et l'approche systémique :.....	38
4.2 Le système éducatif.....	46
5. Quelle place pour chaque partie prenante ?.....	48
6. Comment peut-on mettre en œuvre cet enseignement ?.....	52
6.1 Le changement dans le cursus de l'étudiant ingénieur.....	52
6.2 Les méthodes d'enseignement.....	54
6.3 Les retours d'expérience.....	56
6.4 Les outils de terrain pour former les professeurs.....	61
7. Quelles sont les barrières qui s'opposent à l'intégration ?.....	64
7.1 Barrières sémantiques.....	64
7.2 Barrières à l'innovation.....	69
7.3 Barrières à l'adaptation.....	72
8. Quels sont les leviers d'action invocables ?.....	75
Conclusion sur la revue de littérature.....	80

Partie C : Application des résultats de la revue	83
9. Conception de la grille d'analyse	83
10. Evaluation de l'outil proposé par The Shift Projet – INSA.....	85
Conclusion sur l'application des résultats	89
Conclusions générales et perspectives	90
Bibliographie.....	93
Annexes.....	95
Liste des annexes.....	95
Annexes de la partie B « Revue de littérature ».....	96
Annexe 1 : Les niveaux de complexité.....	96
Annexe 2 : L'approche systémique de Donnalieu et Karsky	96
Annexe 3 : Parties prenantes et études associées	98
A3.1 Les “program’s director”	98
A3.2 Les professeurs	99
A3.3 Les chercheurs	102
A3.4 Le comité de pilotage	105
A3.5 Les étudiants.....	106
A3.6 Les intervenants externes.....	106
Annexe 4 : Les retours d'expériences.....	107
Annexe 5 : Les outils de formation des professeurs	119
Annexe 6 : Les barrières à l'innovation.....	121
Annexe 7 : Les barrières à l'adaptation	125
Annexes de la partie C « Application des résultats »	127
Annexe 8 : Grille d'analyse (vierge) pour outils d'intégration	127

Liste des abréviations

ACV : Analyse de Cycle de Vie

APP : Apprentissage Par Projets

DD : Développement Durable (En Anglais : **SD** : Sustainable Development)

EDD : Education au Développement Durable (En anglais : **ESD** : Education for Sustainable Development)

ESQL : Effective Selection of Quality Litterature

FPMS : Faculté Polytechnique de Mons

PCD : Président de Commission de Diplôme

PPD : Problème Pernicieux de Durabilité

TFE : Travail de Fin d'Etudes

TSP : The Shift Project

Glossaire

Adaptation : Processus par lequel un être ou un organe s'adapte naturellement à de nouvelles conditions d'existence. (CNRTL)

Adéquat : Qui rend compte de son objet de manière exhaustive, c'est-à-dire tant sous le rapport de la compréhension que de l'extension. (CNRTL)

Affordance : L'affordance est la capacité d'un objet ou d'un système à évoquer son utilisation, sa fonction. (Usabilis)

Analytique : Qui se rapporte, qui est relatif à l'analyse ; qui procède par voie d'analyse. (CNRTL)

Anthroposphère : L'anthroposphère peut être définie comme la partie de l'environnement qui est fabriquée ou modifiée par l'homme. En d'autres termes, l'anthroposphère est la sphère du système terrestre ou de ses sous-systèmes où les activités humaines constituent une source importante de changement par l'utilisation et la transformation ultérieure des ressources naturelles, ainsi que par le dépôt de déchets et d'émissions. (Kuhn et al., 2010¹)

Apprentissage par projets : L'apprentissage par problèmes (APP) est une méthode d'enseignement dans laquelle les élèves apprennent à travers la résolution facilitée de problèmes. En APP,

¹ Kuhn, A., Heckeil, T. (2010). Anthroposphere. In: Speth, P., Christoph, M., Diekkrüger, B. (eds) Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-12957-5_8

l'apprentissage des élèves est centré sur un problème complexe qui ne saurait avoir une seule bonne réponse. (Vemury et al., 2018²)

Artefact : Ce qui est réalisé par l'homme, produit artificiel. (CNRTL)

Barrières : Les barrières à la durabilité peuvent être définies comme les obstacles observés en ce qui concerne la mise en œuvre des efforts de durabilité. Les obstacles peuvent être considérés comme des situations ou des problèmes qui rendent difficile l'exécution d'une activité ou d'une action. (Laurett et al., 2019)³

Biais : Déformation, travers. (CNRTL)

Business-as-usual : Activité économique continue et immuable malgré des difficultés ou des perturbations. (TV5 Monde)

Capacité : Une capacité peut être définie comme « l'intégration de connaissance, de comportement, de qualités personnelles et de compréhension utilisée de façon efficace et appropriée (pas seulement dans des conditions familières et spécifiques mais aussi en réponse à des circonstances nouvelles et évolutives) » (Stephenson et al., 1991b) (Lourdel, 2005)⁴

Carte Cognitive : Les cartes cognitives sont définies comme une manière de représenter les points de vue d'une personne dans un domaine ciblé. Les cartes permettent de représenter les relations d'influence entre différentes notions abordées par quelqu'un. Les cartes sont parfois présentées comme des outils de négociation facilitant la réflexion et la prise de décision. (Lourdel, 2005)⁵

Cloisonnement (disciplinaire) : Séparation souvent arbitraire existant entre des groupes de personnes ou de choses. (CNRTL). En l'occurrence, une séparation des disciplines endiguant le traitement de l'une par l'autre.

Compétence : Capacité que possède une personne de porter un jugement de valeur dans un domaine dont elle a une connaissance approfondie. (CNRTL)

Conflit instrumental : Un conflit instrumental désigne l'échec de la genèse instrumentale d'au moins un des trois artefacts en jeu dans une situation d'enseignement-apprentissage faisant intervenir un EIAH. (Marquet, 2005⁶)

²Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>

³ Laurett, R., do Paço, A., 2019. Sustainability Barriers, in: Leal Filho, W. (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1608–1614. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_188

⁴ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

⁵ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Pascal Marquet. Intérêt du concept de conflit instrumental pour la compréhension des usages des EIAH. 2005 (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain), May 2005, Montpellier, France. pp.383-388.

Connaissances utilisables : Qualifient la production de connaissances dont la probabilité de déboucher sur une application durable est supérieure à une connaissance produite sans vocation à y être appliquée. En l'occurrence, on parle de connaissances utilisables dans le domaine de l'EDD.

Constructivisme : Le constructivisme est un courant de pensée apparu au milieu du XX^{ème} siècle selon lequel la connaissance de la réalité est une construction résultant de l'interaction entre l'observateur et la réalité et non le reflet exact de cette vérité. Plus largement, pour le constructivisme, le développement progressif d'un organisme depuis sa conception jusqu'à sa forme mûre (ontogénèse) résulte de la construction d'organisations relativement stables qui se succèdent dans le temps. Le constructivisme se décline en différents courants de pensée en fonction des disciplines épistémiques (sciences formelles, sciences exactes, sciences du vivant, sciences sociales) auxquelles il s'applique. (Toupie)

Contrainte : État de domination exercé par les circonstances sur une personne en la mettant dans la nécessité d'agir malgré soi. (CNRTL)

Déontologie : Ensemble des règles morales qui régissent l'exercice d'une profession ou les rapports sociaux de ses membres. (CNRTL)

Développement Durable : Mode de développement qui assure la satisfaction des besoins essentiels des générations actuelles, particulièrement des personnes les plus démunies, tout en sauvegardant la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins. (Larousse)

Domination : Action ou fait de dominer, d'exercer une puissance souveraine ou une influence prépondérante. (CNRTL)

Dynamique : Mouvement interne qui anime et fait évoluer quelque chose (CNRTL)

Ecodéveloppement : désigne un mode de développement fondé sur le respect de l'environnement (Dictionnaire-Environnement)

Education au Développement Durable : Par une éducation en vue du développement durable (EDD), l'apprenant saisit le sens de sa coresponsabilité dans le respect des bases de la vie et des droits humains (...). Au travers d'une EDD, l'individu apprend à se positionner dans une situation complexe, à imaginer des solutions à des problématiques rencontrées, à identifier des marges de manœuvres possibles et à mettre en œuvre des actions concrètes en tenant compte d'intérêts divergents. Il s'exerce à voir au-delà du niveau individuel afin d'aboutir à des visions d'ensemble intégrant des acteurs collectifs, dont le système politique. En analysant et débattant des valeurs, principes et objectifs du DD, l'apprenant-e parvient de mieux en mieux à faire le lien entre ses choix et les conséquences de ses choix et pratique ainsi un transfert entre ses apprentissages et des situations de vie. (FED/FEE)

Effet d'entraînement : Phénomène social caractérisé par l'imitation du comportement de personnes de son entourage par un individu, afin de respecter certaines normes non écrites. (e-marketing)

Environnement (extérieur) : Ensemble des choses qui se trouvent aux environs, autour de quelque chose. (CNRTL)

Environnement (milieu) : Ensemble des éléments et des phénomènes physiques qui environnent un organisme vivant, se trouvent autour de lui. (CNRTL)

Exogène : Qui provient de l'extérieur, qui a une cause externe. (CNRTL)

Exploitation : Rapport socio-économique fondamental consistant en ce que les hommes démunis de moyens de production doivent travailler en partie gratuitement au profit des possesseurs des moyens de production. (CNRTL)

Heuristique : Qui consiste à faire découvrir par l'élève ce qu'on veut lui enseigner. (CNRTL)

Holistique : Doctrine ou point de vue qui consiste à considérer les phénomènes comme des totalités. (CNRTL)

Impact : Influence déterminante, décisive (CNRTL)

Innové : Introduire du neuf dans quelque chose qui a un caractère bien établi. (CNRTL)

Intégration : Action d'incorporer un ou plusieurs éléments étrangers à un ensemble constitué, d'assembler des éléments divers afin d'en constituer un tout organique ; passage d'un état diffus à un état constant ; résultat de l'action. (CNRTL)

Interdisciplinarité : L'interdisciplinarité concerne « des activités, des problèmes et des projets dépassant les capacités d'une seule discipline et qui implique donc des apports et des interactions de plusieurs disciplines. Alors que la pluridisciplinarité n'est que la juxtaposition de plusieurs disciplines établies, l'interdisciplinarité peut conduire à un dépassement des disciplines concernées et aboutir à des notions transdisciplinaires » (Lourdel, 2005)⁷

Leader : Personne qui jouit d'une grande autorité, notamment au sein d'un groupe restreint, parce qu'elle y est populaire et exerce un ascendant réel. (CNRTL)

Métacognition : La métacognition est l'ensemble des processus, des pratiques et des connaissances permettant à chaque individu de contrôler et d'évaluer ses propres activités cognitives, c'est-à-dire de les réguler. (Universalis)

Modélisation : Opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants. (CNRTL)

Paradigme (épistémique) : Conception théorique dominante ayant cours à une certaine époque dans une communauté scientifique donnée, qui fonde les types d'explications envisageables, et les types de faits à découvrir dans une science donnée. (CNRTL)

Pédagogie : La pédagogie est « l'art d'enseigner ou les méthodes d'enseignement propres à une discipline, à une matière, à un ordre d'enseignement, à un établissement d'enseignement ou à une philosophie de l'éducation ». (Lourdel, 2005)⁸

Pilotage : Action de diriger la politique, l'économie d'une communauté, d'une entreprise ou d'un pays. (CNRTL)

⁷ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

⁸ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Positivisme : Le positivisme est le système philosophique fondé par Auguste Comte qui considère que l'homme ne peut atteindre les choses en elle-même (leur être, leur essence) et que seuls les faits expérimentés ont une valeur universelle. Il a pour but de codifier les connaissances dites "positives", celles qui découlent directement de l'observation et de l'expérience et d'éliminer tout ce qui subit l'influence de la métaphysique. Le positivisme établit une hiérarchie entre les sciences qui part de l'étude des corps bruts et s'élève jusqu'aux corps organisés, aboutissant à la sociologie, qui ne se développera qu'à la fin du XIXe siècle. Par sa vision du monde et ses méthodes, le positivisme est très proche des sciences naturelles. (Toupie)

Problème bien structuré/bien défini : Les problèmes bien structurés sont des problèmes dans lesquels l'état initial, l'état final et les contraintes sont clairement définis. Leur résolution nécessite des connaissances procédurales qui suivent une procédure complètement définie et étape par étape, ou par cœur. (Janetpanic)

Problème pernicieux (ou épineux) de durabilité : Terme introduit à l'origine par Rittel et Webber (1973), qui ont exprimé leur inquiétude quant à l'approche de la planification publique lorsqu'il s'agit de problèmes de diverses dimensions de perdition (...). Par exemple, les problèmes épineux présentent trois similitudes : ils changent avec le temps, les spécialistes des sciences sociales ne sont pas certains de leurs causes profondes en raison de la complexité sociale et les parties prenantes ont des valeurs différentes concernant les défis, qui souvent provoquent des conflits. De plus, les propriétés des problèmes épineux exigent souvent une action collective dans plusieurs secteurs pour créer un changement transformateur et percutant dans tout le système. (Samantha Steidle, 2021)

Profond : Qui approfondit la réalité vécue ou pensée, qui va au fond des choses, qui témoigne d'une grande élévation d'esprit ou de cœur ou de jugement, ou qui a une grande perspicacité. (CNRTL)

Prospective : Discipline qui se propose de concevoir et de représenter les mutations et les formes possibles d'organisations socio-économiques d'une société ou d'un secteur d'activité dans un avenir éloigné, et de définir des choix et des objectifs à long terme pour les prévisions à court ou moyen terme. (CNRTL)

Réductionnisme : Le réductionnisme consiste dans la théorie ou la tendance, principalement en psychologie et en sociologie, à expliquer les faits complexes par une de leurs composantes, laquelle suffirait à rendre compte des autres. (CNRTL)

Ressource : Moyen permettant de se tirer d'embarras ou d'améliorer une situation difficile. (CNRTL)

Risque environnemental : Risque environnemental désigne la possibilité de survenance d'incidents ou accidents générés par l'activité d'une entreprise pouvant avoir des répercussions nuisibles et significatives sur l'environnement. Le Risque environnemental est évalué en tenant compte de la probabilité d'occurrence d'un événement (aléa) et du niveau de danger. (Dictionnaire environnement)

Savoir-faire : Pratique aisée d'un art, d'une discipline, d'une profession, d'une activité suivie ; habileté manuelle et/ou intellectuelle acquise par l'expérience, par l'apprentissage, dans un domaine déterminé. (CNRTL)

Sémantique : Étude d'une langue ou des langues considérées du point de vue de la signification ; théorie tentant de rendre compte des structures et des phénomènes de la signification dans une langue ou dans le langage. (CNRTL)

Technocratie : Système (politique, social, économique) dans lequel les avis des conseillers techniques (dirigeants, professionnels de l'administration) déterminent les décisions en privilégiant les données techniques par rapport aux facteurs humains et sociaux. (CNRTL)

Techno-solutionnisme : Le techno-solutionnisme (ou solutionnisme technophile) caractérise le courant de pensée selon lequel la technologie peut résoudre tous les grands problèmes du monde : la faim, la criminalité, le changement climatique. (7about)

Trivial : Qui satisfait manifestement à une définition ou aux conditions d'un problème, mais n'a, en général, qu'un intérêt intrinsèque mineur. Dont la connaissance n'apporte rien, dont la démonstration est très facile. (CNRTL)

Introduction

Ces dernières années, les préoccupations sociales et environnementales ont émergé au sein des institutions d'enseignement des sciences de l'ingénieur. De nombreuses initiatives apparaissent pour y répondre, tant chez les étudiants qu'au sein de la communauté académique. Parmi ces initiatives, certaines se focalisent sur la question de l'éducation au développement durable, et à la manière dont il est possible d'intégrer les enjeux sous-jacents au sein du cursus des étudiants en école d'ingénieurs. C'est par exemple le cas de The Shift Project, *think tank* fondé pour éclairer le débat sur la transition énergétique, qui a récemment publié un rapport sur comment « Former les ingénieurs du XXI^e siècle »⁹, en collaboration avec l'INSA (Institut National des Sciences Appliquées). Plus largement, un débat public s'est installé, et une communauté s'est formée autour cette thématique.

Ce TFE (Travail de Fin d'Etudes) s'inscrit dans ce contexte et a pour but de s'intéresser à l'intégration des enjeux de développement durable dans la formation des ingénieurs. Le travail a débuté par la découverte de conférences, débats, interviews, rapports, articles, émissions, etc., ce qui a permis de sonder l'étendue de la thématique. Par la suite, une première revue de littérature a permis de dresser un état de l'art des connaissances scientifiques sur l'enseignement des enjeux de développement durable en école d'ingénieurs. Ce dernier a mis en évidence la diversité des sujets possibles (énergie, low-techs, climat, rôle sociétal de l'université, etc.), ce qui a mené à l'observation suivante : une grande richesse existe au sein de la littérature scientifique sur cette thématique. L'opportunité d'approfondir l'un des sujets est apparue, et il a été choisi de réaliser une revue systématique et approfondie de la littérature sur un sujet ciblé : celui de l'intégration des enjeux de DD au travers des systèmes complexes. Ce choix sera largement détaillé tout au long de ce rapport.

Pour y parvenir, une procédure méthodologique a été suivie. Les phases au travers desquelles il a été choisi de passer pour mener et pour structurer la revue de littérature sont : la méthode ESQ « Effective Selection of Quality Littérature », qui a inspiré la phase d'exploration ainsi que la reformulation de la question de recherche. L'approche PRISMA¹⁰ « Preferred Reporting Item for Systematic Review and Meta-Analysis » (reconnue pour servir aux revues de littérature) a été employée pour ce qui concerne la méthodologie de recherche et de sélection des articles. Enfin, la méthode PQC3 « Pourquoi ? Quoi ? Comment ? » a ensuite permis de structurer les titres de chapitres et le placement des résultats au sein de la revue.

Finalement, la revue de littérature permettra de mettre en avant un ensemble de nécessités pour l'intégration, qu'il apparaîtra intéressant de confronter avec l'un des outils opérationnels d'intégration issu d'une initiative de terrain. L'initiative choisie pour cela n'est autre que le rapport de The Shift Project (TSP) mentionnée ci-dessus.

Globalement et concrètement, au niveau de la démarche scientifique, ce travail a consisté à : formuler une question de recherche ayant un intérêt pour la littérature et pour le contexte de son écriture, réaliser une revue de littérature et collecter des données, rétroagir sur la question de recherche, apprendre, comprendre, transmettre des résultats, les formuler de manière intelligible, parvenir à une grille de lecture théorique à appliquer aux initiatives de terrain, et enfin confronter les connaissances scientifiques avec les démarches de terrain.

⁹ The Shift Project, « ClimatSup INSA : Former l'ingénieur au XXI^e siècle », Mars 2022,

<https://theshiftproject.org/article/publication-rapport-former-lingenieur-du-21esiecle/>

¹⁰ Notons qu'elle nous a directement été présentée par l'un de ses experts : Stéphane Moyson.

La suite de ce rapport est articulée comme suit : La partie A « Démarche » commencera par établir un contexte (Chapitre 1) à la thématique de l'intégration, et par décrire la méthodologie suivie et la rédaction qui s'en suit (Chapitre 2). La partie B « Revue de littérature » se décomposera en six chapitres (de 3 à 8), dont les titres correspondent à des résultats de la démarche méthodologique¹¹. Enfin, la partie C « Application aux démarches de terrain » consistera en une description de la conception d'une grille d'évaluation des démarches d'intégration (Chapitre 9) et de son application au rapport de TSP (Chapitre 10).

¹¹ Les titres seront présentés et expliqués à la section 2.3 « Rédaction »

Partie A : Démarche

1. Contexte

La question de l'intégration des enjeux de développement durable dans la formation des ingénieurs n'est pas immédiate, plusieurs éléments de contexte d'ordre historique sont à prendre en compte avant de traiter cette question. Les éléments de fond présentés ici proviennent de sources découvertes au cours de la revue de littérature, et c'est de cette manière que leur importance a pu être mise en évidence.

Plusieurs niveaux¹² de contexte sont à apporter : l'intégration fait d'abord partie d'un ensemble très large de *Développement Durable* (DD), et l'histoire de ce concept représente un enjeu de compréhension du concept dans son ensemble. Ensuite, un second niveau de contexte s'applique à l'*Education au Développement Durable* (EDD), sous-ensemble du DD. On peut considérer que l'EDD est à l'intersection entre les sciences de l'éducation et le DD, bien que l'EDD puisse s'étendre hors du contexte scolaire. Enfin, le dernier niveau de contexte s'applique aux sciences de la complexité, discipline émergente au sein de laquelle on étudie les systèmes complexes, et en intersection avec laquelle les sciences de l'éducation et de la durabilité permettent de traiter depuis peu la question de l'intégration du DD dans la formation des ingénieurs. Ces différents niveaux et leur articulation sont décrits à la figure 1.1. Ainsi, l'intégration se trouve à l'intersection entre les sciences de la complexité et l'EDD, lui-même inclus dans le DD.

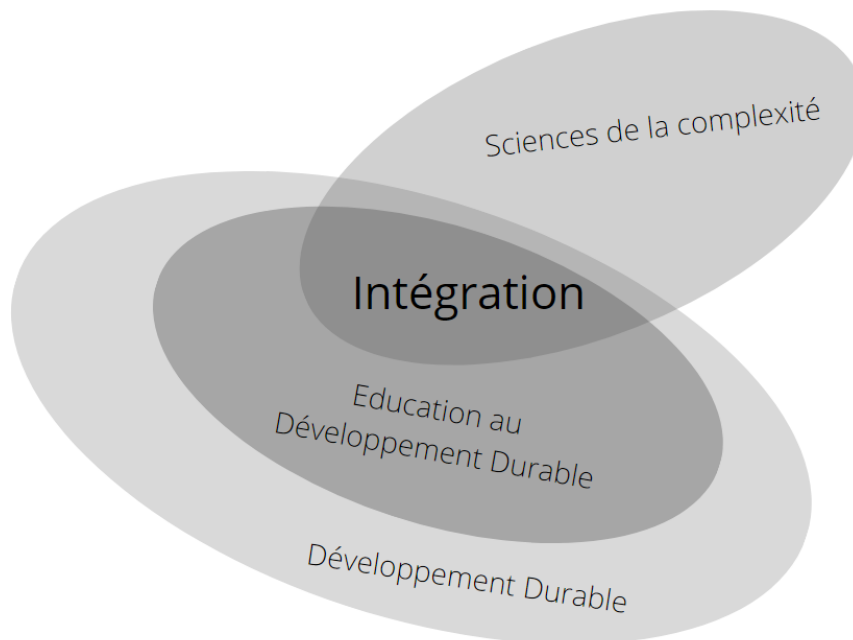


Figure 1.1 : Différents niveaux de contexte et leurs intersections

Concernant le développement durable donc : dès les années 40, les philosophes et les scientifiques ne sont plus les seuls à se préoccuper de l'environnement et l'on voit émerger les premiers mouvements

¹² Les « niveaux » de contexte représentent ici des étapes d'une construction contextuelle, allant d'un cadre très large à un cadre plus précis.

écologistes. A l'époque, on voyait le développement comme un synonyme de croissance et de progrès technologique pour l'occident. Le regard porté vers les pays du sud a néanmoins contribué à forger cette définition par opposition aux pays sous-développés, considérés en retard, et envers lesquels les pays développés ont une mission de modernisation. C'est dans les années 60 que ce mouvement écologiste prend de l'ampleur et commence à critiquer la croissance démographique et économique exponentielle. Elles font place à une conception nouvelle du sous-développement, selon laquelle elle est la conséquence de l'*exploitation* et de la *domination* par les pays développés. Depuis, la notion de développement évolue de sorte à bannir cet héritage sémantique colonial du lexique employé pour parler des pays en voie de développement. (Lourdell, 2005¹³)

Jusqu'aux années 90, c'est une vision antagoniste que l'on développe de la croissance et du respect de l'environnement. En 1972, le rapport Meadows « The limits to growth », publié par le Club de Rome, soutient de manière holistique et quantifiée la critique de la croissance infinie (<https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>). La vision de la civilisation humaine est par là remise en cause par le rapport Meadows ; car il attire l'attention sur la perspective plus que probable d'un *effondrement planétaire*, avec comme conséquences la famine dans les pays pauvres et l'asphyxie par la pollution dans les pays riches. Cette même année, la Conférence des Nations Unies à Stockholm examine la possibilité de préserver l'environnement tout en assurant un développement socio-économique équitable (on parle alors d'*écodéveloppement*). La conférence débouche sur un ensemble de stratégies parmi lesquelles on retrouve la création d'un droit international environnemental non contraignant et le lancement d'un programme d'éducation à l'environnement. On passe progressivement d'une vision de la nature infaillible, infinie et indépassable à une vision complexe et vulnérable. Dans les années 70, et surtout à la suite du choc pétrolier de 73, le modèle occidental de développement est de plus en plus questionné au regard de son retard sur les plans environnementaux, alimentaires et sur la condition des femmes. On ne change donc pas uniquement de vision sur l'environnement mais également sur le développement.

C'est en 1987 que la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, présidée par Mme Gro Harlem Brundtland, propose le terme de *Développement Durable* (*Sustainable Development*) pour désigner un développement qui répond aux besoins du présent sans remettre en cause la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Cette définition est cependant depuis soumise à de nombreuses controverses et de nombreuses difficultés sémantiques s'appliquent au concept¹⁴. L'influence du rapport résultant de cette commission (Rapport Brundtland : <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>) a cependant été significative pour l'implication des gouvernements. En 1992, la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement se tient à Rio de Janeiro, et attribue au DD différents fondements. Tout d'abord, le principe de *précaution*, selon lequel l'absence de connaissances scientifiques sur un sujet environnemental ne doit pas servir au prétexte de remettre à plus tard l'adoption de mesures environnementales. Le principe de *participation* est également développé : les citoyens concernés doivent intervenir dans le processus de consultation et de décision lorsque des substances ou activités dangereuses pour l'environnement et leur santé sont développées. Enfin, le principe de *solidarité* indique que les membres d'une communauté aux intérêts communs doivent développer des sentiments d'obligations réciproques. Lors du sommet de Rio, un plan d'action

¹³ Lourdell, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

¹⁴ Difficultés décrites lors de la section 7.1 « Barrières sémantiques »

international pour l'application du développement durable au XXIe siècle a été constitué : l'Agenda 21 (<https://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/french/action0.htm>).

Depuis 1987, le développement durable se voit aussi largement diffusé dans le domaine industriel, et ce au travers de la création d'associations, d'organisations (ex. le World Business Council for Sustainable Development en 1991), de réseaux d'entreprises (ex. le Business for Social Responsibility en 1992), etc. Les préoccupations pour la « Responsabilité Sociétale des Entreprises » (RSE) en sont à l'origine. (Lourdel, 2005¹⁵)

La figure 1.2 résume les événements décrits ci-dessus, l'apparition des concepts émergents et les acteurs présents dans le secteur. On peut y observer l'impact en termes d'inclusion de parties prenantes des discussions mondiales sur le DD.

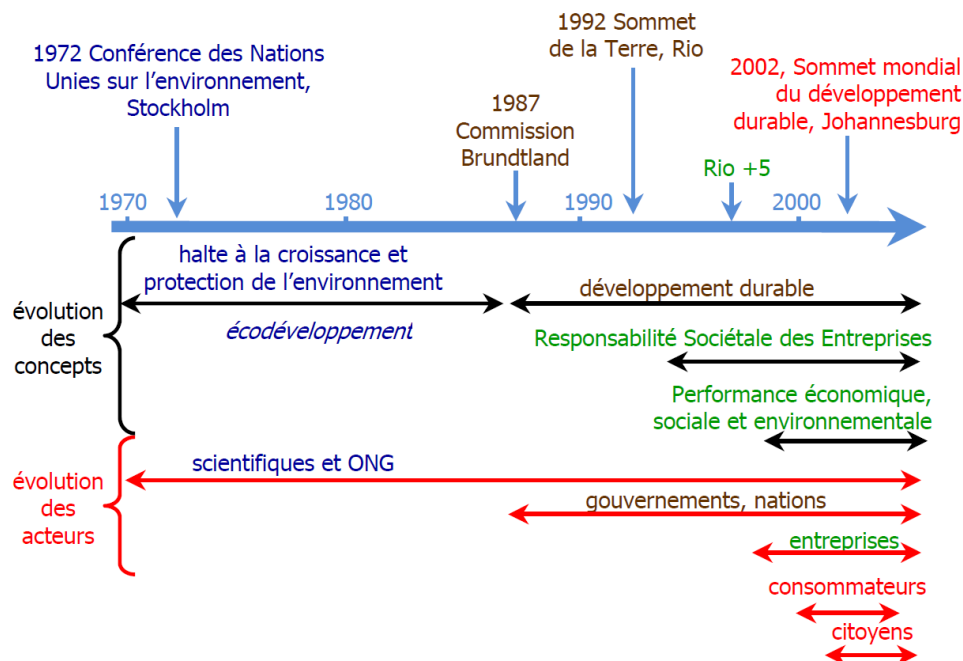


Figure 1.2 : Synthèse des événements marquants, des concepts et des acteurs du DD (Lourdel, 2005¹⁶)

C'est en 2015 que la vision du Développement Durable actuellement la plus répandue émerge au travers des 17 Objectifs de Développement Durable de l'ONU, comme illustré à la figure 1.3. Malgré de nombreuses critiques, les 17 ODD restent encore actuellement le cadre de référence des objectifs du DD dans le monde.

¹⁵ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

¹⁶ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

OBJECTIFS **DE DÉVELOPPEMENT DURABLE**



Figure 1.3 : Les 17 Objectifs de Développement Durable de l'ONU, 2015 (<https://fonda.asso.fr/ressources/les-17-objectifs-de-developpement-durable>)

Concernant le domaine de l'éducation au développement durable (EDD), c'est dans les années 90 que le rapport Brundtland résonne dans les législations nationales avec les principes de précaution, d'actions préventives et correctives, de pollueur-payeur, et de participation des citoyens. C'est en référence à l'implication des citoyens que des programmes de sensibilisation émergent et gagnent lentement les systèmes d'enseignement. La production de connaissances par la recherche académique a dès lors mis en évidence le peu de formation au DD et la nécessité d'y former les enseignants. En 2005, l'UNESCO propose un programme d'intégration du DD dans la formation des universités, l'objectif principal est un changement de position pour les universités : elles doivent devenir un instrument de changement des valeurs, des comportements et des compétences en matière de DD. Malgré ces impulsions, on constate peu de considération et de changement au sein des universités. (Lourdel, 2005¹⁷)

Les sciences de la complexité émergent, elles, progressivement au cours du XXe siècle avec l'apparition de systèmes au comportement apparent chaotique. La formalisation et la conceptualisation des systèmes complexes, puis la découverte de leur application à de nombreux systèmes connus (et étudiés analytiquement jusqu'alors) bouleverse la façon de raisonner, de percevoir et de prédire les effets d'un événement sur l'évolution d'un système. C'est un changement de paradigme¹⁸ qui se profile alors pour la méthode scientifique. Les sciences de la complexité prennent un ancrage épistémique dit *constructiviste*, à l'inverse des sciences traditionnelles basées sur un positionnement *positiviste*. L'ancrage constructiviste des sciences de la complexité est commun avec les Sciences de l'Information et de la Communication et avec les Sciences de l'Education (dérivant sur divers modèles

¹⁷ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

¹⁸ La notion de paradigme épistémologique est un concept développé par l'historien des sciences Thomas Kuhn. Selon lui, les paradigmes épistémologiques ne changent pas progressivement mais brutalement au cours de l'histoire des sciences, c'est la notion de révolution scientifique.

de l'apprentissage) ; mais c'est au sein des Sciences Sociales¹⁹ que le constructivisme trouvera ses applications les plus approfondies. (Trestini, 2016²⁰)

Ces trois niveaux de contexte permettent à présent de formaliser le cadre au sein duquel la question de l'intégration sera abordée :

L'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs, malgré un intérêt marqué des gouvernements depuis les années 90, semble insuffisante. L'apport des sciences de la complexité concernant ce diagnostic et son traitement font précisément l'objet de ce TFE.

La figure 1.4 décrit cet apport de manière schématique. Les systèmes complexes sont ici présentés comme le moyen au travers duquel le système d'enseignement peut prendre en compte le DD. Le haut du graphique présente ce système d'enseignement comme un sous-système de l'*anthroposphère*, elle-même faisant partie du système « Terre ». Il y est mis en avant que, du fait des contraintes de l'*anthroposphère* sur le système Terre, ce dernier impose des contraintes de développement durable. Leurs prises en compte résultent en une contrainte d'intégration au sein du système d'enseignement. Ajoutons à cela que les principes de participation et de solidarité imposent au système d'enseignement une prise en considération du rôle sociétal de l'ingénieur, et qu'il existe des divergences sur la définition et l'application du développement durable. Cette figure est jumelée avec la figure C.1, qui y ajoutera les différents résultats de la revue de littérature.

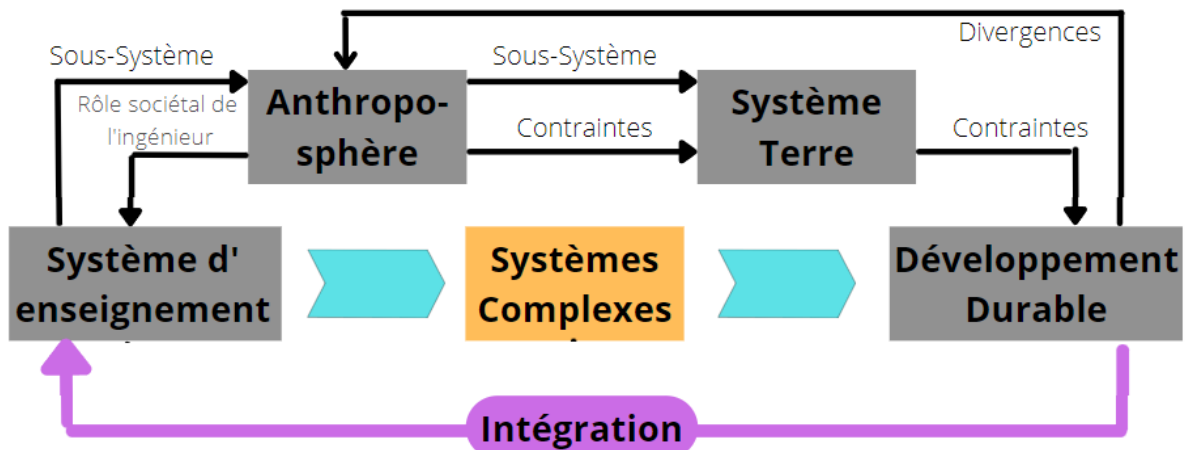


Figure 1.4 : Apport des systèmes complexes à la question de l'intégration

¹⁹ Ces différentes disciplines auront une empreinte notable sur les résultats présentés, et ce du fait du caractère interdisciplinaire du traitement de la question de l'intégration.

²⁰ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

2. Méthodologie et Rédaction

Pour rappel, les objectifs du TFE sont : de formuler une question de recherche ayant un intérêt pour la littérature et pour le contexte de son écriture, de collecter des données issues de la littérature, de rétroagir sur la question de recherche, d'apprendre, de comprendre, de transmettre des résultats, de les formuler de manière intelligible, de parvenir à une grille de lecture théorique à appliquer aux initiatives de terrain, et enfin de confronter les connaissances scientifiques avec un outil d'intégration de ce type.

La méthodologie de recherche dérive implicitement de ces objectifs. Dans un premier temps, la formulation initiale, la collecte de données et la formalisation de la question de recherche (et de l'équation de recherche²¹ par la même occasion) ont été menées suivant l'approche ESQ – « Effective Selection of Quality Littérature » (Schumann et al., 2020²²). Notons que cette phase d'exploration a mené à constituer un premier état de l'art du domaine, et que c'est sur base de cet état de l'art que la question de recherche a été précisée (Section 2.1 « Exploration et formalisation de la question de recherche »). La question et l'équation de recherche ayant été validées, la collecte d'articles scientifiques et leur sélection ont représenté une seconde phase, guidée par l'approche PRISMA - « Preferred Reporting Item for Systematic Review and Meta-Analysis » (Mateo, 2020)²³. Cette approche s'applique aux revues de littérature en particulier en proposant une procédure systématique allant de la collection des articles à la validation de la bibliographie, en passant par plusieurs étapes de sélection (application de critères d'exclusion et d'inclusion). La lecture d'articles séquencée (inhérente à l'approche PRISMA) et une lecture approfondie accompagnée de la mise en évidence des éléments de résultats ont permis de développer la compréhension nécessaire à interpréter - et plus tard à transmettre - les résultats (Section 2.2 « Recherche »). Leur formulation et structuration au sein de la revue a pu s'appuyer sur une dernière approche : PQC3 – « Pourquoi ? Quoi ? Comment ? » (Vautier, 2001²⁴). Les résultats ayant été formalisés et classifiés, ils ont pu être employés dans la conception d'une grille de lecture pouvant être appliquée à des démarches d'intégration de terrain (Section 2.3 « Rédaction »).

2.1 Exploration (état de l'art) et formalisation de la question de recherche

La formulation initiale du sujet et de la question de recherche est la suivante :

« Former les Ingénieurs du XXIème siècle - Intégrer les enjeux du dérèglement climatique dans la formation des ingénieurs : pourquoi et comment ? »

Pour traiter ce sujet, une phase d'exploration s'est avérée nécessaire. D'une part puisque la littérature s'est avérée fournie et diversifiée, et d'autre part puisque la question est très générale et peut donc être

²¹ On entend par « équation de recherche » la suite de mots clés et d'opérateurs à entrer en barre de recherche dans les bases de données

²² Schumann, H., Berres, A., Stehr, T., Engelhardt, D., 2020. Effective Selection of Quality Literature During a Systematic Literature Review. *Informing Science* 23, 77–87. <http://dx.doi.org/10.28945/4551>

²³ Mateo, S., 2020. Procédure pour conduire avec succès une revue de littérature selon la méthode PRISMA. *Kinésithérapie, la Revue* 20, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2020.05.019>

²⁴ VAUTIER Jean-François, 2001. Systèmes complexes Présentation générale. *Techniques de l'ingénieur Management industriel base documentaire : TIP084WEB*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-ag1500>

prise selon plusieurs angles d'approches. Notons que pour entrer dans la problématique, la première approche s'est portée sur des éléments d'inspiration, c'est-à-dire la découverte de ressources informelles comme des conférences, des vidéos, des articles de presse, etc. Ces éléments d'inspiration ont constitué une introduction au domaine et ont permis de voir l'étendue des disciplines s'étant approprié la question de l'EDD. Certaines de ces ressources ont pu mettre en évidence les notions de systémique et de complexité (et par extension de systèmes complexes), qui constituent l'angle d'approche choisi par la suite.

Dans l'exercice d'exploration, il est également apparu nécessaire de sonder la littérature scientifique de sorte à établir un premier état de l'art du domaine. Pour cela, l'approche « Effective Selection of Quality Literature – ESQL » (Schumann et al., 2020²⁵) a été utilisée. A proprement parler, toutes les phases de cette approche n'ont pas été suivies car très chronophages, mais la première phase « keyword search » a été effectuée. Cette phase consiste à proposer une première équation de recherche sur base de mots-clés très généraux et avec peu d'indications de recherches, puis de rentrer cette équation dans des bases de données ; et d'en retirer un champ lexical sur base des articles traitant effectivement du sujet dans son ensemble. Dans ce cas-ci, cette première équation est :

(Environnement* OR Climate OR Sustainable Développement) AND Education
AND Engineer

Les mots-clés constituant le champ lexical ainsi formé sont basiquement les mots-clés propres à chaque article mais peuvent également être prise dans le titre. Le lexique constitué gagne par ailleurs à être pondéré selon la fréquence d'apparition d'un mot clé, et à être décomposé en diverses catégories. Cet exercice a découlé sur l'élaboration de la figure 2.1 reprenant l'état de l'art du champ lexical résultat, décomposé en catégories (Phénomènes, Enseignement, Ingénierie et Systémique) et présentant les mots-clés dans l'ordre décroissant de leur fréquence d'apparition.

L'approche ESQL indique alors qu'une reformulation/précision de la question de recherche ainsi que de l'équation en dérivant peut être effectuée. Pour cela, on peut soit choisir de prendre les mots clés les plus fréquents et traiter la question directement, soit reformuler la question lorsque le domaine apparaît trop large ou mal exploré et prendre les mots-clés correspondant à cette précision. C'est cette deuxième option qui a été prise, principalement du fait de la multitude d'angles d'approches ayant pu être observés, mais aussi du fait de la nécessité de trouver un cadre conceptuel pour traiter la question de l'intégration.

A la suite des premières lectures et des éléments d'inspiration, le choix de traiter la question de l'intégration du DD dans la formation des ingénieurs au travers des systèmes complexes est apparu pertinent, d'autant plus lorsqu'il est soutenu par les publications les plus récentes. L'équation de recherche a dès lors pu être précisée (avec : *Complex System* ou *System Dynamics*) et étoffée via des synonymes (exemple : *Obstacle*, *Drag*, *Limit* pour le terme *Barrier*). Le choix de faire apparaître explicitement les barrières et les leviers d'action dans l'équation de recherche provient d'une nécessité d'étendre le terme *strategy*, qui n'est pas fréquemment employé dans la littérature mais qui contribue pourtant à l'intérêt de ce TFE. Les trois thèmes principaux apparaissent cependant toujours (*Engineer*, *Sustain**, *Education*).

²⁵ Schumann, H., Berres, A., Stehr, T., Engelhardt, D., 2020. Effective Selection of Quality Literature During a Systematic Literature Review. *Informing Science* 23, 77–87. <http://dx.doi.org/10.28945/4551>



Figure 2.1 : Etat de l'art des mots-clés sur l'EDD

Pour ces raisons, plusieurs propositions ont été faites, et l'équation résultante permettant de prendre en compte les différentes dimensions du sujet a pu être générée :

Engineer* AND (Complex System OR System Dynamics) AND (Environment OR Climate OR Sustain*) AND (Barriers OR Drag OR Obstacle OR Limit OR Restraint OR Strategy OR Lever) AND (Education OR Learn* OR Teach*)

Notons que les dimensions de barrières et de leviers ont été ajoutés dans un deuxième temps afin de préciser la recherche. Aussi, certains articles ne citent pas explicitement la notion de système complexe mais s'en approchent fortement au travers des concepts de barrières et de leviers.

De cette équation, il est possible de reformuler la question de recherche comme suit :

Les systèmes complexes permettent-ils de traiter l'intégration des enjeux de développement durable au sein de la formation des ingénieurs ?

2.2 Recherche

Concernant la recherche d'articles, celle-ci constitue le principal moyen de fournir des résultats à la question énoncée ci-dessus. Dans le cas d'une revue de littérature, la méthodologie équivaut donc à un plan d'expérience, et l'objet utilisé pour produire des résultats est la littérature scientifique. Aussi, dès lors que la question et l'équation de recherche ont été validées, cette procédure peut donc commencer. Les étapes parcourues pour mettre en évidence des résultats de recherche sont : la collection d'articles, leur lecture, leur sélection, et enfin leur valorisation.

La recherche s'est tout d'abord effectuée en entrant - en recherche avancée - l'équation de recherche résultante dans les bases de données accessibles via l'UMONS, à savoir :

- ScienceDirect ;
- Scopus ;
- Springer ;
- PNAS ;
- Techniques de l'ingénieur ;
- ProQuest ;
- Cairn (pour le point de vue des sciences de l'éducation) ;
- ERIC (pour le point de vue des sciences de l'éducation).

Une première observation a permis de montrer que, selon la base utilisée, la quantité de résultats était très variable. Il est donc apparu nécessaire d'intervenir sur la manière de présenter la recherche pour obtenir une quantité raisonnable de résultats (entre 10 et 200), et ce au travers d'opérations de stimulation (quand $n < 10$) et de limitation (quand $n > 200$). Les opérations de stimulation et de limitation ne sont pas présentées dans un ordre d'importance ou de fréquence d'utilisation car ont été utilisés principalement selon les possibilités conférées par le moteur de recherche.

Pour **stimuler** la recherche, il est possible de :

- Enlever des termes à l'équation lorsque ce sont des AND, et surtout si ces mots sont implicitement soutenus par la spécialisation de la base de données ;
- Ajouter des mots clés (avec comme opérateur "OR") repris dans les keywords des articles particulièrement pertinents ;
- Ajouter aux options des disciplines périphériques comme "social sciences" ou "environnemental sciences" ;
- Chercher dans les sources ou dans les articles connexes (en général sur pas plus d'un niveau sauf si l'article de deuxième niveau est particulièrement pertinent) ;
- Accepter des articles dont le sujet permet juste d'apporter du contexte à l'étude dans son ensemble ou sur un point précis de l'étude ;
- Chercher dans des revues qui ne sont pas directement liées à l'enseignement ou aux sciences de l'ingénieur (exemple : revues spécialisées dans la transdisciplinarité ou dans la psychologie) ;

- Octroyer une recherche spécifique à un auteur lorsqu’il revient fréquemment sur un thème pertinent pour l’étude ;
- Consulter les sources des articles lorsqu’elles permettent une mise en contexte ou l’explication de préalables théoriques peu expliqués dans l’article de base.

Pour **limiter** la recherche, il est possible de :

- Ajouter des mots clés de recherche, en s’inspirant de la première équation générale ;
- Ajouter des restrictions de sous-discipline : le plus souvent pour *Sustainable Engineering* ou *Engineer Education* ;
- Ajouter des restrictions de temps (en général pour limiter à $t > 2000$ pcn.) ;
- Ajouter des restrictions de revue, ou plus souvent exclure les revues qui ne sont pas du tout liées ;
- Restreindre aux articles de recherche, de synthèse ou revues de littérature ;
- Ajouter des “NOT” lorsque des thèmes non pertinents apparaissent trop souvent ;
- Refuser les articles s’ils n’abordent pas les enjeux environnementaux au moins à titre d’exemple ;
- Refuser les articles abordant les enjeux environnementaux sous l’angle des écogestes du quotidien (spécifiques ni aux ingénieurs ni à l’enseignement) ;
- Demander que des mots clés soient repris dans le titre ou l’abstract nécessairement, et pas juste dans le corps de texte (*Education, Engineer, Sustainable, Environnement*) ;
- De manière générale, ne pas traiter les articles dont le titre établit clairement un hors sujet.

Dès lors qu’un article semble – au regard de son titre et de son abstract – entrer dans l’un des thèmes principaux de la recherche (Education, Ingénierie, Développement Durable, Systèmes Complexes), il peut être enregistré dans Zotero (<https://www.zotero.org/>) via l’extension de navigateur. Zotero est un logiciel permettant d’enregistrer facilement des ressources bibliographiques, mais il peut arriver qu’il ne retire pas toutes les informations nécessaires au référencement, l’ajout manuel peut alors prendre le relais. A ce stade, il n’est pas utile de réaliser davantage de sélection sur les articles car cela fera l’objet de l’approche PRISMA ci-dessous.

La sélection des articles pour la revue de la littérature vient donc dans un second temps, avec l’approche PRISMA - « Preferred Reporting Item for Systematic Review and Meta-Analysis » (Mateo, 2020²⁶). Cette dernière a pu être présentée par l’un de ses experts : Stéphane Moyson, qui y a apporté des éléments de précision ainsi que son expertise dans l’adéquation de cette approche pour le sujet traité. PRISMA consiste en plusieurs étapes successives :

1. L’exportation vers Zotero du dossier résultant d’une recherche par équation et avec utilisation des options de recherche ;
2. L’identification et la suppression des doublons ;
3. La constitution de critères d’exclusion et d’inclusion ;
4. La sélection sur base du Titre et de l’Abstract ;
5. La sélection sur base du Texte complet ;
6. La ré-inclusion d’articles sur base des critères d’inclusion et selon les besoins de l’étude.

Ces étapes sont représentées à la figure 2.2. L’approche PRISMA fait par ailleurs la distinction entre les articles éligibles à la synthèse qualitative et la synthèse quantitative. Cette distinction est

²⁶ Mateo, S., 2020. Procédure pour conduire avec succès une revue de littérature selon la méthode PRISMA. *Kinésithérapie, la Revue* 20, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2020.05.019>

importante lorsque, du point de vue qualitatif, il est nécessaire de décrire le sujet et de poser un cadre théorique en reprenant quelques-uns des articles ; et lorsque du point de vue quantitatif, les résultats de la revue sont quantifiés au travers de proportions (exemple : 20% des articles mettent en avant que ...). Ce n'est rigoureusement pas le cas dans cette revue puisque presque tous les résultats sont qualitatifs. Notons cependant qu'une certaine partie des articles de référence sont déjà des études quantitatives permettant de mettre en avant la prédominance de certains résultats par rapport à d'autres.

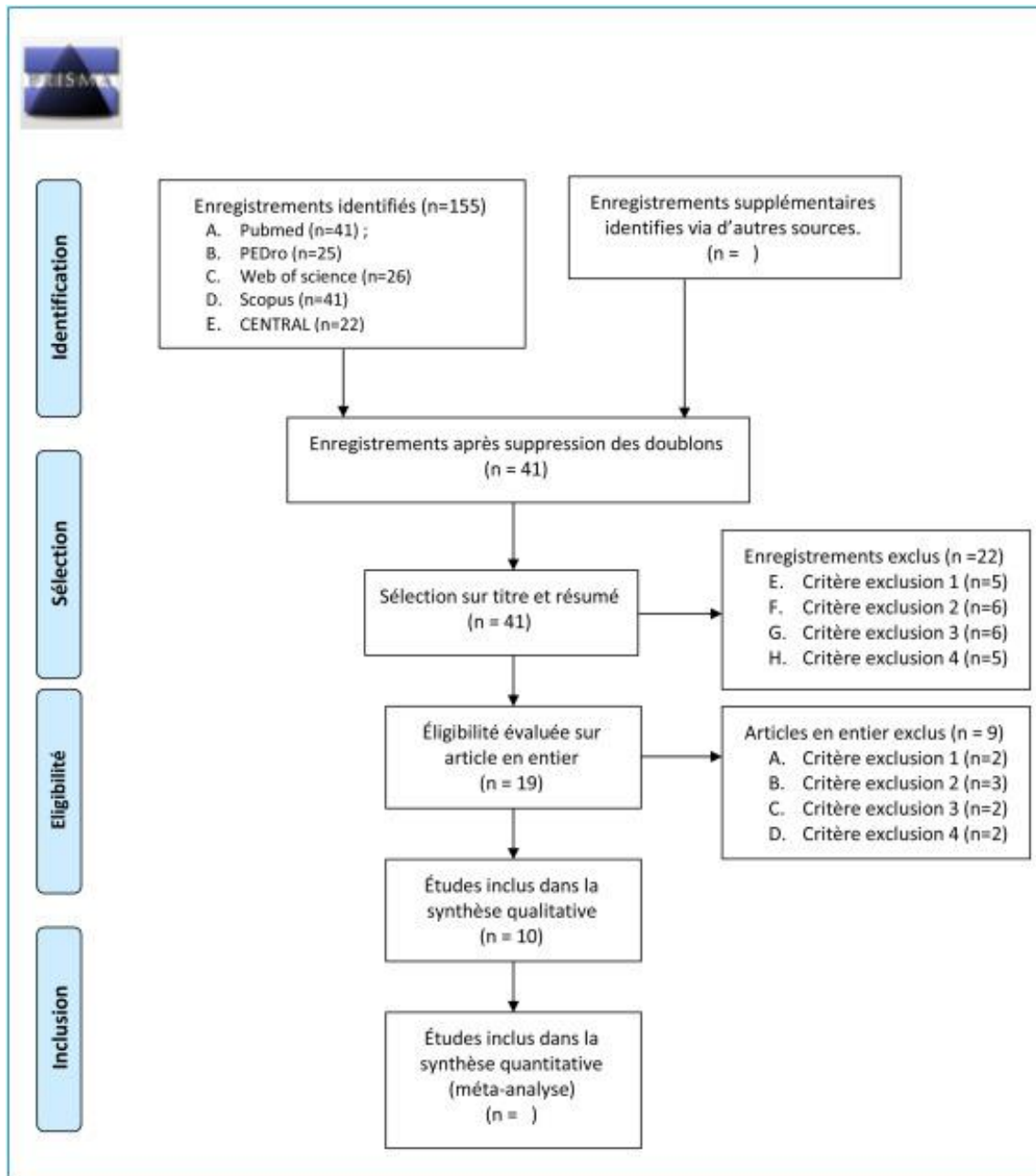


Figure 2.2 : Approche Prisma (Mateo, 2020²⁷)

²⁷ Mateo, S., 2020. Procédure pour conduire avec succès une revue de littérature selon la méthode PRISMA. Kinésithérapie, la Revue 20, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2020.05.019>

Il apparaît qu'une différence notable existe entre l'approche PRISMA stricte et l'approche suivie lors de ce travail : l'étape n°1 consiste à prendre dans Zotero tous les résultats sans pré-sélection, là où en l'occurrence, une pré-sélection sommaire filtrant les articles hors-sujets a été réalisée. La raison de cette pré-sélection - sur base du titre et de l'abstract - est de limiter la quantité d'articles hors sujets dans Zotero²⁸. En effet, l'approche PRISMA étant déjà chronophage, et la proportion d'articles totalement hors-sujets étant grande (parfois plus de 50% des résultats) : l'étape d'exclusion des articles hors sujet a été réalisée en partie en amont. Cependant, la vigilance et la compréhension de l'anglais n'étant pas toujours infaillible, les mots pouvant être polysémantique et la question de recherche ayant été précisée en cours de travail, le critère d'exclusion « hors sujet » a dû être appliqué à des articles ayant initialement passé cette étape de pré-sélection. L'étape n°2 « Suppression des doublons » a cependant été respectée strictement grâce à l'option « Doublons » dans Zotero.

Concernant la sélection à proprement parler, les critères d'exclusion et d'inclusion ont évolué selon les besoins et les résultats, pour se stabiliser autour des critères listés ci-dessous :

Les critères d'exclusion :

- A. L'article est hors sujet ;
- B. L'article n'est plus d'actualité ;
- C. Les termes/mots clés principaux sont employés dans un sens différent ;
- D. L'article n'apporte aucun élément de contexte ou de cadre n'ayant été apporté plus simplement ou plus précisément dans un autre article ;
- E. Le sujet n'est pris qu'à titre d'exemple et n'est traité que de manière marginale dans le cadre de l'article.

Les critères d'inclusion/de ré-inclusion :

- F. Lors d'un défaut d'explications dans les articles principaux, ou lorsque l'article permet de poser un cadre sémantique à une dimension explorée ;
- G. Lorsqu'un article apporte de la précision sur une dimension peu explorée ;
- H. Lorsqu'un article permet de poser davantage de cadre ou de contexte au TFE, lorsqu'il propose une illustration éclairante.

Les critères d'exclusion ont été appliqués aux articles sur base de leur Titre et Abstract dans un premier temps, puis à nouveau pour les articles restants sur base du Texte complet. Lorsque ces critères ont été validés et appliqués, la phase de collection des résultats a pu commencer avec la mise en évidence puis la retranscription (voir plus bas), et c'est seulement après avoir réalisé une bonne partie de la retranscription - et donc après avoir une idée représentative des thèmes abordés par la littérature - que les critères de ré-inclusion ont pu être appliqués selon les besoins. Les principales zones d'ombre²⁹ ont permis d'élaborer puis de valider les critères de ré-inclusion. Ces derniers ont pu être appliqués après une relecture des abstracts, des titres de chapitres et des figures des articles exclus par un critère D ou E.

²⁸ Zotero, dans sa version gratuite, impose une limite d'article en termes de stockage

²⁹ On entend par « zone d'ombre » un domaine qui intervient dans la question de recherche, mais qui n'a pas pu être exploité au travers des articles sélectionnés. Les zones d'ombre constituent des opportunités de mieux cadrer certains résultats ou d'approfondir un point précis.

Il est à noter qu'un critère d'exclusion supplémentaire s'est ajouté après cette phase de ré-inclusion, et ce pour des raisons de saturation théorique³⁰. La saturation théorique est un concept qui renvoie au processus au cours duquel on observe progressivement que plus aucun article n'apporte de donnée nouvelle. Bien que quelquefois, ces articles apportent une nouvelle formulation ou une nouvelle schématisation intéressante, le fond des informations n'en reste pas moins saturé. C'est pourquoi certains articles, pourtant éligibles à la base, ont été exclus sur base du critère de saturation : I.

La description de chacune de ces étapes pour chacun des articles est décrite dans un fichier Excel, et les bibliographies primaires (avant sélection par PRISMA) et finales (après PRISMA et compléments de sélection) sont disponibles en fichier Zotero (.ris) dans un cloud, accessible en suivant le lien suivant : <https://1drv.ms/u/s!Av99IUDp980abjJO5UOiXTO-IUM?e=eYatUy>

Au cours de l'exercice de revue de littérature, certaines zones d'ombre et de saturation théorique ont donc pu être observées. Ces phénomènes ont mené à rétroagir sur la sélection d'articles issus de l'approche PRISMA. Cette dernière ne prend cependant pas en compte ce type de rétroaction puisqu'elles dépendent largement du contexte, des besoins et des observations.

L'approche PRISMA ayant été appliquée et complétée, les articles non-exclus ou réinclus (c'est-à-dire *éligibles* selon la dénomination de PRISMA) ont pu être lus, mis en évidence et retranscrits dans un *document de collection* (document duquel il a ensuite été possible de s'inspirer pour l'écriture de la revue de la littérature).

L'étape de mise en évidence consiste à enregistrer au format PDF et à lire les articles éligibles résultants de l'approche PRISMA, à mettre en évidence les éléments pertinents au regard du sujet et à annoter le document avec la partie concernée (titre, sous-titre) par l'élément. Concernant l'article de manière générale, des notes peuvent être écrites sur Zotero pour indiquer si l'article est particulièrement pertinent, s'il a déjà été lu et annoté ou s'il a été abandonné au cours de l'approche PRISMA. Ces notes permettent d'avoir une vision d'ensemble de l'avancement dans le travail de collection.

Les articles éligibles ayant été mis en évidence, les éléments pertinents ont pu être retranscrits dans le document de collection. Le nombre total d'articles (et de thèses) employés pour la revue s'est élevé à 22. Ces articles sont issus du processus de sélection détaillé au sein du fichier Excel *ad hoc*. En ce qui concerne le document de collection, les informations y ont dans un premier temps été placées le plus authentiquement possible (avec une faible reformulation), et la retranscription s'est contentée de placer les informations dans la bonne partie sans davantage de structuration. Après cette étape achevée, une lecture du document (à ce stade, composé d'informations totalement décousues) a permis de proposer une structure plus détaillée (sous-titres, énumérations, etc.) et dont les étapes sont placées selon un ordre intelligible suivant les grandes thématiques abordées.

³⁰ Plus d'informations ici : <https://123dok.net/article/echantillonnage-saturation-th%C3%A9orique-m%C3%A9thodologie-recherche.4zpv860z>

2.3 Rédaction

La phase de rédaction de la revue de littérature s'est décomposée en trois étapes de structuration, d'intégration et de formulation. La rédaction des chapitres périphériques (introduction, contexte, méthodologie, conclusion) a été réalisée de manière itérative, entre des propositions et des révisions. Celle de l'application à une démarche de terrain a consisté en une transposition des résultats de la revue en une grille d'analyse.

La phase de structuration de la revue de littérature demande en amont de se demander par quel chemin il est possible de passer pour structurer les éléments de résultats entre eux ? La structuration sous la forme « Pourquoi ? Quoi ? Comment ? » a pour cela été choisie. Cette structure ressort d'une méthode systémique connue sous le nom de PQC3 (Vautier, 2001³¹).

Elle se compose initialement des étapes suivantes :

1. *Pourquoi : pourquoi l'ingénieur doit-il s'intéresser aujourd'hui à cette notion de « systèmes complexes » ?*
2. *Quoi : quelles sont les caractéristiques fondamentales des « systèmes complexes » ?*
3. *Comment : comment élaborer ou piloter les « systèmes complexes » ?*
4. *Qui : qui est concerné par l'élaboration et le pilotage des « systèmes complexes » ?*
5. *Où : où se préoccuper de l'élaboration et du pilotage des « systèmes complexes » ?*
6. *Quand : quand se préoccuper de l'élaboration et du pilotage des « systèmes complexes » ?*
7. *Pour quoi faire : quels sont les résultats attendus par cette prise en compte ?*
8. *Combien : qu'est-ce que ça rapporte et coûte de mettre en œuvre une approche adéquate pour élaborer ou piloter des « systèmes complexes » ?*
9. *Conséquences : quelles sont les conséquences induites par la mise en œuvre d'une approche adéquate pour élaborer ou piloter des « systèmes complexes » ? (Vautier, 2001³²)*

La méthode PQC3 s'applique de manière très générale à l'étude des systèmes complexes, mais il est nécessaire de la particulariser au sujet d'étude. Cette particularisation, également influencée par la structuration thématique du document de collection, a mené à reformuler les neuf étapes de la méthode en les six titres de chapitre qui constituent la revue de littérature (Partie B) :

- Chapitre 3 Pourquoi enseigner les enjeux sociaux, climatiques et environnementaux dans la formation des ingénieurs ? Pourquoi sous l'angle des systèmes complexes ?
- Chapitre 4 : Qu'est-ce qu'un système complexe ? Comment s'applique-t-il au système d'enseignement ?
- Chapitre 5 : Quelle place pour chaque partie prenante ?
- Chapitre 6 : Comment peut-on mettre en œuvre cet enseignement ?
- Chapitre 7 : Quels sont les barrières qui s'y opposent ?
- Chapitre 8 : Quels sont les leviers d'action qui permettent de les surmonter ou de favoriser cet enseignement ?

³¹ VAUTIER Jean-François, 2001. Systèmes complexes Présentation générale. Techniques de l'ingénieur Management industriel base documentaire : TIP084WEB. <https://doi.org/10.51257/a-v1-ag1500>

³² VAUTIER, J.-F., 2001. Systèmes complexes. Techniques de l'Ingénieur. URL <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/theorie-et-management-des-systemes-complexes-42131210/systemes-complexes-ag1500/>

Cette structuration étant validée, et le document de collection des résultats de la littérature ayant pu être structuré de la sorte, les étapes d'intégration et de rédaction ont pu suivre.

L'intégration des éléments retirés des articles a été la principale étape de mise en forme au niveau de la revue de littérature. Lors de cette phase, des paragraphes introductifs, conclusifs et de liaison ont été rédigés et les résultats ont été placés dans un ordre intelligible et sous une forme condensée (la plupart du temps des tableaux ou des cartes mentales). S'en est naturellement suivi l'étape de rédaction des chapitres périphériques : Introduction, Contexte, Méthodologie et Conclusion générale.

L'application des résultats de la revue (Partie C), quant à elle, a premièrement consisté en l'élaboration de critères d'évaluations résultant de la revue de littérature. Ces critères sont en grande partie issus des titres ou sous-titres de chapitres de la revue. Une procédure de cotation a par ailleurs été conçue, et ce pour témoigner de la prise en compte de chaque critère dans le plan d'intégration.

Partie B : Revue de littérature

Cette revue de littérature prend pour objet l'étude de l'enseignement aux enjeux de développement durable en école d'ingénieurs, et plus précisément l'étude de l'intégration de ces enjeux au sein du système d'enseignement. Deux grands axes se dégagent donc de cette étude : la phase transitoire que constitue l'intégration, et la phase de régime que constitue l'EDD ; cette dernière servant à appuyer les attendus du processus d'intégration. En effet, comme décrit lors du chapitre 1 « Contexte », les efforts menés dans l'identification de ces attendus ont été approfondis dans l'histoire ; là où la dimension stratégique pour les mettre en application le sont moins, et c'est de cette manière qu'il est apparu intéressant de mener une revue de littérature sur cette dimension.

La stratégie d'intégration, à partir du moment où ses objectifs sont définis, nécessite un cadre théorique. En l'occurrence, le cadre choisi est celui des systèmes complexes. Le chapitre 3 de la revue abordera donc les objectifs de l'EDD en école d'ingénieurs (tant pour les entreprises que pour la société dans son ensemble), mais aussi questionnera la pertinence – au regard de ces objectifs - d'utiliser les systèmes complexes pour traiter l'intégration.

Dès lors, il apparaîtra nécessaire de définir la notion de système complexe et ce en quoi elle intervient dans l'EDD et dans l'intégration. Cette définition restant très générale dans un premier temps, il conviendra d'établir une procédure permettant d'identifier et de comprendre un système complexe en particulier. A ce titre, le système d'enseignement pourra être défini comme un cas particulier des systèmes complexes, et l'intégration comme une phase particulière de ce système à mener. Le chapitre 4 s'attèlera donc à définir les systèmes complexes, l'approche permettant de les particulariser ainsi que les résultats de cette approche appliquée au système d'enseignement.

Le chapitre 5 s'attèlera à décrire les grandes catégories d'éléments constitutifs du système d'enseignement au travers d'une décomposition de la communauté académique en parties prenantes. Ces parties prenantes ont un rôle initial au sein du système d'enseignement, mais ils ont aussi un rôle spécifique potentiel dans le processus d'intégration. Leur mise en perspective permettra de dégager des pistes d'amélioration.

Le chapitre 6 procèdera à une description des principaux attendus de l'intégration ainsi qu'à une décomposition des conflictualités au sein du système d'enseignement lors de la phase d'intégration ; conflits ayant pu être observés lors d'expériences d'intégration. Une attention y sera portée aux dimensions didactiques et pédagogiques.

Lors du chapitre 7, on observera la manifestation de ces conflictualités au travers de barrières s'opposant à l'intégration, et la décomposition thématique pouvant en être faite. Cette décomposition soutiendra par ailleurs un cadre systématique d'identification des barrières.

Enfin, le chapitre 8 décrira les moyens stratégiques (appelés leviers d'action) de parachever l'intégration : au travers de la levée des barrières et au travers de bonnes pratiques issues de la littérature.

3. Pourquoi intégrer les enjeux de développement durable dans la formation des ingénieurs ? Pourquoi sous l'angle des systèmes complexes ?

L'intégration des enjeux de développement durable requiert potentiellement de nombreuses ressources (humaines, financières, matérielles, etc.), et nécessite donc en amont de positionner sa pertinence. Autrement dit de poser la question « pourquoi intégrer les enjeux de DD dans la formation des ingénieurs ? ». En quoi l'intégration de ces enjeux représente-t-elle un intérêt pour la société et réciproquement pour les ingénieurs ? Cette partie s'attèle à y répondre, dans un premier temps avec un approche « besoin des entreprises » et « rôle sociétal de l'ingénieur », mais aussi d'« impact environnemental » et enfin d'« adéquation de la démarche de l'ingénieur face aux problèmes de la durabilité ». Ces approches permettront de poser des objectifs à l'EDD et mèneront à s'intéresser à un éventuel changement dans le « cursus de l'ingénieur » et à son caractère complexe.

A ce titre, les sciences de la complexité ont pu montrer que la théorie des systèmes complexes permet d'identifier la complexité d'une tâche. Le fait de prendre cet angle d'approche nécessite donc également de positionner sa pertinence. Les enjeux de DD et leur enseignement sont-ils complexes ? L'intégration de ces enjeux l'est-elle en conséquence ? Autrement dit, de répondre à la question « pourquoi les systèmes complexes comme cadre théorique pour caractériser et mener l'intégration ? ». Cette question sera principalement traitée au cours des sections 3.5 « Cursus de formation de l'ingénieur » et au chapitre 4 « Qu'est-ce qu'un système complexe ? », mais fera l'objet d'un renforcement au cours de toutes les autres.

3.1 Besoins évolutifs des entreprises

Lourd, 2005³³ Décrit une évolution des considérations des entreprises susceptibles d'engager des ingénieurs à l'heure actuelle. D'après elle, la seule rentabilité ne suffit plus aux entreprises : une réflexion à long terme, une capacité d'anticipation des risques et un engagement éthique sont des dimensions qui ressortent particulièrement dans leurs préoccupations. En cause : une nécessité de prendre en compte les récentes réglementations, une volonté de prendre en considération des aspects sociétaux et de responsabilité, et l'approfondissement du dialogue avec davantage de parties prenantes qui s'accompagne de plus d'interactions sociales. La figure 3.1 met ces différentes dimensions en relation : un premier niveau – pragmatique – s'attèle à s'adapter aux réglementations nouvelles et aux systèmes de management innovants ; un second niveau avec une stratégie et un positionnement à long terme au travers de capacités d'anticipation ; et un troisième niveau avec une éthique partagée permettant d'établir un dialogue sur une base commune de compréhension et de motivation. De gauche à droite, la dimension contraintes/opportunités apparaît et les liens permettant de concilier les deux sont représentées par les doubles flèches.

³³ Lourd, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

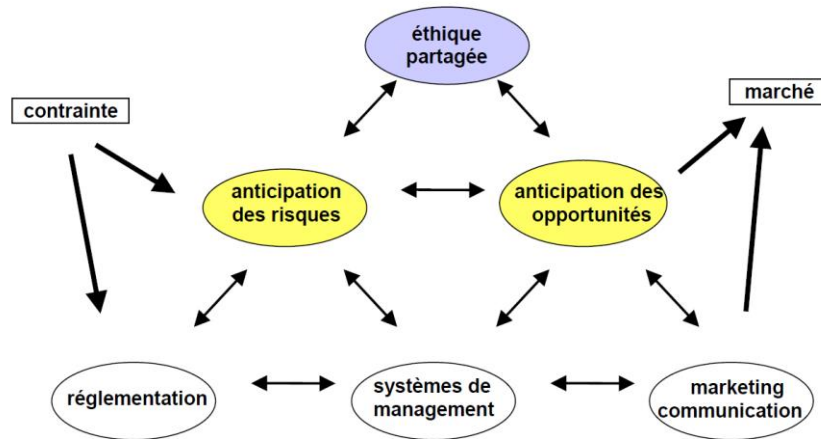


Figure 3.1 : Nouveaux besoins des entreprises (Lourdel, 2005³⁴)

3.2 Rôle sociétal de l'ingénieur

Au-delà de cette constatation, Lourdel apporte un ensemble de soutiens sémantiques sur l'ingénierie et le rôle sociétal d'un ingénieur. Ces définitions se complètent mutuellement : D'après le Conseil National des Ingénieurs et des Scientifiques de France: « *l'ingénieur est un agent économique qui utilise des connaissances et des compétences à dominante scientifique ou technique, pour concevoir, réaliser ou exploiter un système d'organisation de personnes, de données abstraites ou de moyens matériels, en vue d'apporter à un besoin exprimé, à partir de critères rationnels convenus, la meilleure réponse possible, en prenant en compte les facteurs humains, sociaux, et économiques de la société* » (CNISF, 1997). L'Office de la Langue Française ajoute à cela qu'un ingénieur doit « *résoudre des problèmes concrets de nature technologique dans le souci de l'intérêt commun, ou à intervenir dans l'exécution de ces travaux* ». Dans la Charte d'Éthique de l'Ingénieur (CNISF, 2001). (...) *L'ingénieur est présenté comme « le lien indispensable entre les technologies et la communauté humaine »*. La charte cite également la nécessité des ingénieurs de prendre en compte *les aspects environnementaux qui doivent faire partie intégrante du métier d'ingénieur*. (...) *le développement durable est cité : « l'ingénieur doit inscrire ses actes dans une démarche de "développement durable" »*. La CTI (Commission des Titres d'Ingénieurs) va plus loin en définissant le métier de l'ingénieur comme « *consistant à poser et résoudre des problèmes souvent complexes liés à la conception, à la réalisation et à la mise en œuvre de produits, de systèmes ou de services.* » (Lourdel, 2005³⁵)

³⁴ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

³⁵ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

On peut retirer de ces définitions, ainsi que de l'évolution récente des attentes des entreprises, que :

L'ingénieur doit intégrer dans ses démarches un ensemble de considérations plus larges que des dimensions purement techniques et technologiques.

Pourtant, il est également mis en avant par Lourdel, 2005³⁶ que des sentiments technophobes émergent *de facto* à l'encontre des sciences de l'ingénieur, jugées trop déconnectées des réalités de terrain et trop intéressées par la technologie qu'elle en oublie son impact sociétal et environnemental ; ce à quoi l'on peut avancer qu'un changement de posture (de paradigme) de l'ingénieur du XXI^e siècle permet une réconciliation entre la technique, la raison et l'éthique.

C'est également le point de vue de Wise et al., 2010³⁷, pour qui l'opportunité d'une collaboration à l'échelle globale pour les problèmes environnementaux est déterminante, et pour qui les ingénieurs en seraient parties prenantes. Cela requiert de redéfinir le mode de pensée des ingénieurs. Ils écrivent : *The days of engineers creating designs and structures without an understanding of the impacts created by the end product are over. It is time for engineers to be educated more broadly and to think differently – to think of system-wide impacts and implications and to practice holistic engineering.*

Ils adressent pour cela deux conditions nécessaires : l'augmentation du nombre d'étudiants ingénieurs et la **formation** d'ingénieurs *holistiques*. Cette deuxième condition répond aux défis du XXI^e siècle, considérés plus complexes, intégrés et globaux. Il apparaît dès lors nécessaire d'élargir les considérations et les compétences des ingénieurs au-delà des aspects techniques. Il est nécessaire que les ingénieurs soient capables de comprendre les implications, ramifications et répercussions de leurs productions. Ceci constitue, selon les auteurs, non pas une évolution mais bien une *révolution*³⁸.

Les contextes à intégrer dans la vision holistique des ingénieurs de demain sont :

- Les changements climatiques ;
- Les nouvelles réglementations ;
- Les préoccupations environnementales et énergétiques ;
- Les préoccupations liées aux ressources humaines, ressources naturelles, carburants, nourriture, eau, etc. ;
- La prise en considération de la croissance démographique ;
- Les changements économiques ;
- L'émergence de nouvelles normes sociales (comme avec le 11 septembre) ;
- Les changements dans la composition des étudiants étrangers ;
- Les problèmes de sécurité intérieure et de défense du territoire.

Ces contextes et les défis liés sont caractérisés de *complexes* et nécessitent un traitement *intégré* de la complexité dans tous les métiers liés à la conception. Les ingénieurs doivent donc être capables de voir au-delà des exigences et de l'utilisation prévue, et d'anticiper et de générer les conséquences d'un produit ou d'un service.

³⁶ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

³⁷ Wise, C.K., 2010. Engineers of Tomorrow: Holistic-Thinking System Engineers, in: Grasso, D., Burkins, M.B. (Eds.), *Holistic Engineering Education: Beyond Technology*. Springer, New York, NY, pp. 227–241. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1393-7_17

³⁸ Le terme révolution semble ici renvoyer à la révolution scientifique au sens de Thomas Kuhn

Ces conséquences, qu'elles soient escomptées ou non, qu'elles soient d'ordre technique ou non, peuvent être maîtrisées par les ingénieurs : c'est l'objectif de l'étude de l'impact social et environnemental.

3.3 Impact socio-environnemental de l'ingénieur

Leifler et al., 2020³⁹ avancent que, historiquement parlant, les ingénieurs ont été formés solidement sur les dimensions techniques et mathématiques mais ont contribué aux sous-tenants technocratiques de la société moderne. Dans l'optique d'y remédier, ils désignent les principales compétences qu'un ingénieur diplômé devrait avoir sur le domaine du développement durable comme étant : de concevoir un produit, un procédé ou un système en tenant compte des *contraintes* économiques, environnementales, sociétales, politiques, éthiques, sanitaires, sécuritaires, etc. ; de prendre conscience des impacts des solutions d'ingénierie et d'y appliquer la *déontologie* de l'ingénieur ; et enfin de concevoir des produits, procédés ou systèmes en tenant compte des prérequis et des objectifs de société développés dans le cadre du DD. Plus encore, les auteurs estiment qu'un ingénieur diplômé doit être capable d'avoir une réflexion sur les *affordances* (c'est à dire la tendance d'un objet ou d'un environnement à suggérer un mode d'utilisation) et limitations de la technologie ainsi que le rôle que revêt la technologie dans la société.

Boyle, 2004⁴⁰ met en évidence le fait que les critères de décision pour une innovation technologique sont souvent l'efficacité, la productivité, la rentabilité et la rentabilité ; là où les critères de minimisation à la production ou de traitabilité des déchets, l'affect des écosystèmes et des communautés, la qualité des relations sociales sont souvent mis au second plan. Il est dès lors important de faire intervenir des principes éthiques, d'incorporer des compétences en communication et en comptabilité et de délivrer des cours transdisciplinaires sur l'environnement. Dans l'identification de problèmes, des connaissances en management, en écologie et en sociologie permettent de délier les problèmes apparents (ceux qu'on pense devoir traiter) et les problèmes structurels (ceux qui sous-tendent les problèmes apparents).

En résumé, les ingénieurs du XXI^e siècle doivent prendre conscience des impacts sociaux et environnementaux de leurs activités et y appliquer des principes éthiques. Cela doit passer par le développement de connaissances et de compétences interdisciplinaires (donc, non techniques) et par le développement de la capacité à délier les problèmes apparents des problèmes structurels. Nous aurons l'occasion de voir au cours de la section 6.1 « Le changement dans le cursus de l'ingénieur » que cette distinction peut plus simplement s'exprimer par le caractère respectivement *surfacique* et *profond* lors d'une démarche de changement.

3.4 Adéquation de la démarche de l'ingénieur aux problèmes de la durabilité

Si la société a des besoins concernant les ingénieurs, il en va de même à l'inverse. Les ingénieurs ont des besoins spécifiques en matière de compréhension de la société pour le traitement des problèmes de

³⁹ Leifler, O., Dahlin, J.-E., 2020. Curriculum integration of sustainability in engineering education – a national study of programme director perspectives. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 21, 877–894. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-09-2019-0286>

⁴⁰ Boyle, C., 2004. Considerations on educating engineers in sustainability. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 5, 147–155. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370410526233>

durabilité. Vemury et al., 2018⁴¹ décrivent l'importance pour les ingénieurs - futurs cadres dans les domaines de l'industrie - d'avoir une approche *holistique* devant des problèmes issus du dérèglement climatique, de la raréfaction des ressources, de la pollution, etc. Ces problèmes sont connus sous l'appellation de *Problèmes Pernicieux de Durabilité* (PPD) (En anglais : *Wicked Sustainability Problems*). Ces derniers sont qualifiés de problèmes complexes et interdisciplinaires, leur traitement implique des impacts sociaux et environnementaux.

Cela nous amène à positionner le caractère complexe des enjeux de DD :

Les enjeux de DD, sur lesquels les ingénieurs sont amenés à travailler, sont de plus en plus complexes. Ceci du fait des contraintes et des impacts environnementaux grandissants, de l'augmentation de la complexité sociale et du caractère holistique des problèmes de durabilité.

Si ces problèmes, dont le DD semble principalement constitué, nécessitent une approche interdisciplinaire de par leur nature holistique, l'identification des problèmes de *cloisonnement disciplinaire* et d'*approche analytique* est un préalable au positionnement de l'adéquation de la démarche de l'ingénieur.

Linow et al., 2019⁴² se sont intéressés à la discipline mécanique en particulier. Selon eux, les ingénieurs mécaniciens sont archétypiques du cloisonnement disciplinaire dans le sens où ils ambitionnent principalement de devenir expert dans un domaine technique particulier, surtout chez les étudiants. Ils décrivent la perception des modules d'enseignement sur le dérèglement climatique comme subsidiaire. L'une des raisons avancées est que les étudiants mécaniciens n'ont souvent pas les clés pour comprendre les termes utilisés, considérés alors comme vagues et sans signification précise.

Selon les auteurs, les étudiants mécaniciens sont formés à résoudre des problèmes linéaires au travers d'indicateurs quantifiables (efficacité, matériaux primaires, résistance, ...) et restent limités par des contraintes économiques et techniques. Seulement la gamme de problèmes dits pernicieux nécessite (entre autres) un traitement technique. Autrement dit il y a un besoin de la société envers les ingénieurs mécaniciens de s'approprier ce type de problèmes. Ces problèmes ne sont cependant pas des problèmes linéaires et nécessitent un traitement adéquat. Appliquer une *démarche linéaire* (ou *analytique*) est alors qualifié de « vouée à l'échec » dans ce cadre. Il s'agirait au contraire de « piloter » plutôt que de « résoudre » un problème pernicieux.

L'expérience montre que les étudiants, mêmes introduits à la gestion systémique d'un problème, privilégieront la plupart du temps des résolutions simplificatrices et analytiques dans les problèmes auxquels on les confronte. Les auteurs avancent que c'est une réflexion pédagogique qui doit être menée à cet effet.

⁴¹ Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>

⁴² Linow, S., 2019. Integrating Climate Change Competencies into Mechanical Engineering Education, in: Leal Filho, W., Hemstock, S.L. (Eds.), *Climate Change and the Role of Education, Climate Change Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 33–51. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32898-6_3

Cette réflexion doit avoir pour objectif le développement de compétences individuelles, nécessaires à la bonne résolution de problèmes pernicieux :

- La pensée complexe : considérer les tenants et aboutissants globaux d'un projet, d'un procédé, d'une intervention, etc. ;
- La capacité d'anticipation : anticiper l'évolution à moyen terme de la société afin d'y adapter sa conception et d'éviter les raisonnements motivés et le sur-optimisme technologique ;
- La compétence normative : baser ses décisions sur une déontologie de l'ingénieur et sur une éthique macroscopique ;
- La **stratégie** : être capable de mener des transitions/ des transformations sur un système avec une vision à long terme et une gestion des imprévus ;
- Les compétences interpersonnelles : le respect de la culture et des convictions de chacun, la communication non violente et le respect des autres disciplines.

En résumé, pour rendre la démarche des ingénieurs adéquate aux PPD, dont le niveau de complexité est significativement plus élevé que les problèmes linéaires qu'ils sont actuellement en mesure de résoudre, une réflexion pédagogique et le développement de compétences individuelles ad hoc apparaît nécessaire.

Ce changement de démarche n'est pas sans rappeler la notion de paradigme épistémique⁴³ abordé dans le chapitre 1 « Contexte », et son passage d'un ancrage positiviste à un ancrage constructiviste. Cela revient à dire que les types de faits scientifiques à découvrir et les types d'explications appuyant ces faits sont amenés à changer.

3.5 *Cursus de formation de l'ingénieur*

Wise et al., 2010⁴⁴ décrivait plus haut la nécessité de former des ingénieurs holistiques, la CTI appuyait la nécessité de prendre en compte les enjeux socio-environnementaux dans la formation des ingénieurs (cf. section 3.2 « Rôle sociétal de l'ingénieur »), et l'UNESCO a développé un programme d'intégration du DD dans les universités (cf. Chapitre 1 « Contexte »). Ces initiatives soutiennent donc l'intégration du DD dans le cursus de l'étudiant en école d'ingénieur.

C'est également le cas de Mula et al., 2017⁴⁵ qui décrivent l'avenir du travail des ingénieurs comme complexe et incertain, ce qui nécessite qu'ils soient capables d'intégrer la pensée complexe et la *prospective* (réflexions et projections sur l'avenir) dans chacune de leurs démarches. Il ne s'agit dès lors plus de mettre en place des présentations d'experts mais d'implémenter de nouvelles pratiques d'enseignement et de **repenser le cursus de formation dans son ensemble**. Les auteurs mettent en avant des innovations pédagogiques telles que la prospective, l'apprentissage du changement et ses

⁴³ La notion de paradigme épistémique est un concept développé par l'historien des sciences Thomas Kuhn. Selon lui, les paradigmes épistémiques ne changent pas progressivement mais brutalement au cours de l'histoire des sciences, c'est la notion de révolution scientifique.

⁴⁴ Wise, C.K., 2010. Engineers of Tomorrow: Holistic-Thinking System Engineers, in: Grasso, D., Burkins, M.B. (Eds.), *Holistic Engineering Education: Beyond Technology*. Springer, New York, NY, pp. 227–241. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1393-7_17

⁴⁵ Mulà, I., Tilbury, D., Ryan, A., Mader, M., Dlouhá, J., Mader, C., Benayas, J., Dlouhý, J., Alba, D., 2017. Catalysing Change in Higher Education for Sustainable Development: A review of professional development initiatives for university educators. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 18, 798–820. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-03-2017-0043>

mécanismes, la pensée systémique, l'engagement des parties prenantes, la réflexion critique et l'apprentissage engagé et participatif.

Selon eux, bien que de nombreuses connaissances d'expert aient été introduites dans certaines disciplines, l'on observe très peu de changement systémique dans l'éducation au développement durable dans les universités.

Wise et al., 2010⁴⁶ estiment pour cela que :

- L'enseignement des **systèmes complexes** et leur intégration dans le cursus existant en est un préalable nécessaire ;
- Le cloisonnement disciplinaire grandissant joue un rôle contreproductif dans l'intégration de ces innovations ;
- Sur le plan purement technologique, les universités doivent former les futurs ingénieurs sur l'*actualité technologique* ;
- Sur le plan non technologique, les étudiants doivent être formés sur les cultures internationales, sur la communication et sur la déontologie des ingénieurs.

Pour résumer, les besoins de la société et des entreprises envers les futurs ingénieurs sont en cours d'évolution. La complexité grandissante des problèmes pour lesquels les ingénieurs sont amenés à travailler impose un changement de démarche, de posture de leur part. L'approche linéaire et disciplinaire jusqu'alors privilégiée - ancrée sur un paradigme positiviste - est inadéquate à cette complexité. Une approche plus systémique, holistique, prospective et interdisciplinaire – dont l'ancrage épistémique est constructiviste - semble être *a contrario* davantage en mesure d'y répondre. Pour cela, non seulement un changement en profondeur peut être adressé au cursus de formation, mais l'apprentissage d'une telle approche peut aussi passer par l'enseignement des systèmes complexes.

Cela amène à tirer la conclusion suivante :

Si la complexité des problèmes de durabilité augmente, et que la démarche des ingénieurs n'est actuellement pas adéquate à la complexité, il apparaît nécessaire pour eux de changer de démarche, et par extension de paradigme.

A ce stade, les systèmes complexes (et la complexité de manière générale) apparaissent comme un objet d'étude destiné à être enseigné aux étudiants et à être appliqué à l'enseignement pour développer une approche systémique chez les futurs ingénieurs. La section 4.1 « Les systèmes complexes et l'approche systémique » et la section 6.3 « Retours d'expériences » permettront d'étayer ce point. Il sera également relevé par après que les systèmes complexes permettent également de poser un cadre à l'identification du système d'enseignement, et que ce système rentre dans cette catégorie de systèmes. La section 4.2 « Le système éducatif » et le chapitre 5 « Quelle place pour chaque partie prenante ? » décrira cette identification. Par ailleurs, il sera également mis en évidence que les caractéristiques et *dynamiques*⁴⁷ propres aux systèmes complexes permettent, au travers de nombreuses associations avec des dynamiques propres à l'enseignement et au DD, de traiter la question de l'intégration (cadre général, terminologie, phénomènes).

⁴⁶ Wise, C.K., 2010. Engineers of Tomorrow: Holistic-Thinking System Engineers, in: Grasso, D., Burkins, M.B. (Eds.), Holistic Engineering Education: Beyond Technology. Springer, New York, NY, pp. 227–241. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1393-7_17

⁴⁷ Le terme « dynamique » est employé dans ce rapport dans un sens plus large que celui qu'on lui attribue au sein des sciences de l'ingénieur. Il n'est d'ailleurs pas employé comme un adjectif mais comme un nom commun.

4. Qu'est-ce qu'un système complexe ? Comment s'applique-t-il au système d'enseignement ?

Les systèmes complexes peuvent être utilisés à deux fins principales concernant l'EDD : d'une part comme objet à enseigner, et d'autre part comme conceptualisation du système d'enseignement auquel on souhaite intégrer les enjeux de DD. La première dimension revient à définir, caractériser et décrire le comportement des systèmes complexes (en général), ainsi que de la démarche permettant d'approcher un tel système (en particulier) et de parvenir à sa description et prospection propre. La seconde dimension concerne l'identification des éléments et des particularités du système d'enseignement ; des *artefacts* permettant la médiation des relations entre l'apprenant, l'outil et le savoir par un processus d'instrumentalisation ; et *a fortiori* l'identification des *conflits instrumentaux* mettant en péril le processus d'apprentissage.

4.1 Les systèmes complexes et l'approche systémique :

Lors de cette section, trois concepts seront introduits : les systèmes, les systèmes complexes et l'approche systémique. Cependant, la notion de « système » telle qu'elle sera définie et utilisée diffère de sa définition dans le domaine des sciences de l'ingénieur. Par extension, les notions de « dynamique » et de « changement » sont également employées dans un sens différent. En effet, les sources de cette section ne proviennent pas d'articles spécifiques à cette discipline, et développent davantage un vocabulaire propre aux sciences de la complexité.

Trestini, 2016⁴⁸ définit tout d'abord un *système* (sans parler encore de complexité à ce stade) de manière générale au travers de trois propositions sémantiques :

- Un système se définit au travers de l'objet qui le caractérise : Système solaire, thermique, nerveux, etc.) ;
- Un système est également un ensemble d'éléments en interaction, il est dynamique et est organisé en fonction d'une finalité (système juridique, éducatif, carcéral, etc.) ;
- Un système est enfin – et plus généralement – quelque chose d'identifiable, réalisant une action ou assumant une fonction, dotée d'une structure, qui évolue dans le temps, qui est inséré dans un environnement, et qui suit une finalité.

Tout système est par ailleurs caractérisé par trois principes fondamentaux :

- La *Totalité* : un système n'est pas un agrégat d'éléments isolés mais constitue un tout cohérent et indivisible. Du fait de son caractère *total*, un élément agissant dans un système finit toujours par avoir un *impact* global sur le système entier. Mathématiquement, on peut représenter cet impact au travers de quantités Q_i dont l'évolution entraîne une variation sur toutes les autres quantités du système, comme dans la figure 4.1 ;
- La *Rétroaction* : chaque élément d'un système peut s'informer et agir sur d'autres, puis avoir un effet sur d'autres éléments encore jusqu'à ce que cette cascade d'influence suive une

⁴⁸ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

circularité et agisse sur l'élément initial. Les rétroactions peuvent être positives lorsqu'elles amplifient une action, ou négatives lorsqu'elles l'inhibent ;

- La *Finalité* : un système dans son ensemble suit une finalité, un but, pour lequel il tend un comportement stable. Lorsqu'une action est menée à l'encontre de cette finalité, des forces s'y opposent de sorte à revenir à un fonctionnement stable, on appelle ce phénomène l'*homéostasie* (plus simplement défini comme la résistance au changement).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dQ_1}{dt} = f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ \frac{dQ_2}{dt} = f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dQ_n}{dt} = f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{array} \right.$$

Figure 4.1 : Formalisation mathématique du principe de totalité (Trestini, 2016⁴⁹)

Avant de définir la complexité, il importe de la distinguer d'un caractère *compliqué* ou *difficile*. Si un système complexe est par nature imprédictible par le calcul, il n'en est pas compliqué pour autant et inversement. Un système compliqué peut être résolu avec de la rigueur, de la connaissance et du temps, il ne se caractérise donc que par l'effort à fournir pour sa résolution. Le propre d'un système complexe (en tant qu'objet) est qu'aucun effort n'est suffisant à le résoudre, et ce non pas parce qu'il est plus compliqué que les autres, mais parce que sa nature diffère fondamentalement de la représentation que l'on s'en fait (en tant que modèle). L'opposition facile/difficile (ou compliqué) joue sur le plan de l'effort, là où la complexité – que l'on peut opposer à la *trivialité*, comme décrit plus bas – joue sur la prédictibilité des actions menées sur ce système. (Trestini, 2016⁵⁰)

Garbolino et al., 2019⁵¹ décrivent un système spécifiquement complexe tout d'abord comme un système dynamique, c'est à dire perpétuellement en mouvement, en transition. Les caractéristiques de ces systèmes sont diverses, on peut notamment y retrouver :

- Des *états* et des *forces* : L'état étant une représentation de quantifications indépendantes entre elles et les forces étant des actions menant à la modification de la valeur de ces quantités, accompagnées d'une certaine *résistance* ;
- Des *boucles de rétroactions* : Le caractère ininterrompu des interactions entre éléments permet de voir l'émergence d'actions d'un élément B agissant (directement ou indirectement) sur un élément A, lui-même agissant au préalable sur B ;

⁴⁹ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

⁵⁰ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

⁵¹ Garbolino, E., Chéry, J.-P., Guarnieri, F., 2019. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools, in: Guarnieri, F., Garbolino, E. (Eds.), Safety Dynamics: Evaluating Risk in Complex Industrial Systems, Livres Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96259-7_1

- Des *non-linéarités* : Des relations causales peuvent en venir à devenir non-linéaires, c'est à dire que soit la force résultante d'une différence d'actions n'y est pas proportionnelle, soit que l'effet d'une force sur l'évolution d'une quantité n'y est pas proportionnel ;
- Des *deadlines* : Lorsqu'un système comporte plusieurs boucles de rétroactions, il se peut que la constante de temps de réponse d'une boucle ne soit pas du même ordre de grandeur que l'autre. Lorsque les constantes de temps sont sensiblement différentes, le comportement global du système peut devenir instable. Il arrive donc que le système doive concilier des considérations à court et à long terme, comme illustré à la figure 4.2. De nombreux systèmes élaborent une stratégie de *deadlines* pour la résolution des considérations à long terme, de sorte à rapporter des constantes de temps au même ordre de grandeur. Cependant, la conciliation des objectifs court-termistes et long-termistes apparaissent parfois comme antagonistes et s'accompagnent d'un *effet secondaire* ;
- Des *changements structurels* : Il arrive que pour faire face à un changement d'environnement, un système complexe ait la nécessité de changer de structure⁵². Des traces de l'histoire des précédentes structures sont souvent conservées pour comprendre l'héritage implicite qu'il a eu sur une nouvelle structure, pour apprendre des incompatibilités du passé et pour identifier les possibles incompatibilités futures entre le système et son environnement.

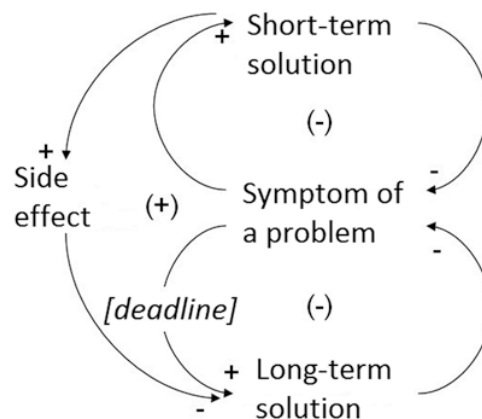


Figure 4.2 : Conciliation des solutions à court et à long terme (Garbolino et al., 2019⁵³)

De tels systèmes peuvent être modélisés par des systèmes d'équations différentielles dont on fait varier les conditions initiales et les paramètres internes afin de proposer divers *scénarios*. Les véritables difficultés étant d'estimer avec précision ces paramètres et d'être confrontés à de hauts degrés d'incertitudes, surtout pour des problèmes à long-terme. Cette démarche de modélisation s'inscrit dans l'ensemble plus large dit de *prospective*, qui ne se résume pas à la modélisation informatique.

⁵² Ce changement de structure peut être considéré comme une dynamique particulière et transitoire

⁵³ Garbolino, E., Chéry, J.-P., Guarnieri, F., 2019. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools, in: Guarnieri, F., Garbolino, E. (Eds.), Safety Dynamics: Evaluating Risk in Complex Industrial Systems, Livres Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96259-7_1

Selon Trestini, 2016⁵⁴, des caractères spécifiques à la complexité existent au-delà de la dynamique, ils ne font cependant pas tous consensus et une large littérature en épistémologie étaye ces divergences. L'auteur observe cependant des grandes tendances :

- Une *variété* de constituants et de leurs interactions, dans leur nature, leur type, leur structure interne ;

Un système complexe est une *totalité* composée d'une variété de constituants organisés entre eux en niveaux arborescents. C'est de cette variété que ressort une grande partie des comportements globaux du système complexe.

- Un aspect *ouvert et chaotique* ;

Un système complexe est d'abord ouvert en ce qu'il entretient des relations avec son environnement, il subit donc des *perturbations* externes – a priori imprévisibles - qui lui demandent une *adaptation*.

Un système complexe est également proche d'un *système chaotique*. Concept développé par Edward Lorentz pour décrire le comportement d'un modèle météorologique très sensible aux conditions initiales, et qui l'a mené à rejeter les modèles déterministes de Galilée et Newton. Un système complexe n'est cependant pas strictement chaotique car son comportement est soumis à moins d'incertitudes.

La notion de complexité est ainsi étroitement liée à celle de *quantité d'informations* de Shannon. Cette quantité peut alors constituer une mesure de la complexité en ce qu'une grande quantité d'informations induit l'improbabilité de constituer le système tel qu'il est en rassemblant au hasard ses constituants et en ce qu'une grande variété de constituants en interaction induit une grande quantité d'informations au sens de Shannon. La complexité est donc à opposer à la *trivialité*, qui se caractérise par une faible quantité d'informations au sens de Shannon. Un système trivial est résoluble sur base d'un ensemble restreint d'informations.

Trestini distingue alors la complexité algorithmique (pour un système artificiel) de la complexité naturelle (pour un système naturel) au travers d'une quantité d'informations Shanonienne nettement supérieure dans cette dernière. Il est donc possible, par la modélisation, de *décomplexifier* la complexité naturelle par la complexité algorithmique. Ainsi, la *prédictibilité* d'un système complexe naturel dépend directement de la différence relative de quantité d'informations Shanonienne entre lui et le système-objet qu'il modélise.

- Une dimension auto-organisatrice et homéostatique dominée par les *couplages* (interaction forte) et rétroactions ;

L'auto-organisation est définie comme la capacité de s'adapter à une augmentation de la complexité. Dans un premier temps après cette augmentation, le système se désorganise et puis se réorganise en augmentant sa quantité d'informations propre (et donc sa complexité). L'auto-organisation possède l'avantage d'apprendre de ses réorganisations, ainsi la variété de réponses à différents stimuli grandit avec le temps et avec les types de perturbations.

⁵⁴ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

L'homéostasie est définie comme la résistance au changement, elle est particulièrement présente dans tous les systèmes sociaux (et à fortiori éducatifs). Les systèmes sociaux identifient souvent le changement comme une atteinte à l'équilibre, et luttent en continu pour le maintien de la stabilité du système. Plus encore, toute leur organisation interne contribue au maintien de cette stabilité, et ce au travers de nombreux *couplages* et *rétroactions* entre constituants.

- L'*émergence* de nouvelles propriétés.

La notion d'émergence est souvent induite par celle de perturbation (lorsque l'émergence est une amplification), mais pas toujours : l'existence de nucléons, puis d'atomes, puis de molécules et enfin de fluides, dérivant de l'assemblage primitif de particules élémentaires, est un exemple de propriétés émergentes liées à des assemblages et/ou couplage en cascade de différents systèmes entre eux.

Selon la présence plus ou moins marquée de ces caractéristiques, un système complexe peut être classifié selon son *niveau de complexité*, comme décrit à l'annexe 1.

Prenant en compte tous ces éléments, Trestini, 2016⁵⁵ en déduit qu'un système complexe ne peut être *résolu*. La résolution n'est à priori possible que pour les systèmes analytiques et fermés, pour lesquels l'évolution est modélisable avec précision et où peu d'incertitudes planent sur leur comportement futur. Un système complexe nécessite au contraire un suivi, et pour cela doit être représenté, modélisé, prospecté et *piloté* en conséquence⁵⁶. Les systèmes dérivant de cet exercice de pilotage se décomposent alors en système opérant (pour le système-objet), en *système de pilotage* et en système d'information (entre les deux), comme décrit à la figure 4.3. On peut y distinguer trois flux fondamentaux : les flux d'informations Opérants (de gauche à droite), Bottom-up (de bas en haut), et Top-down (de haut en bas). On peut alors distinguer les flux d'informations verticaux par leur nature : les flux Bottom-up sont des flux de représentation et les flux Top-down sont des flux de décision.

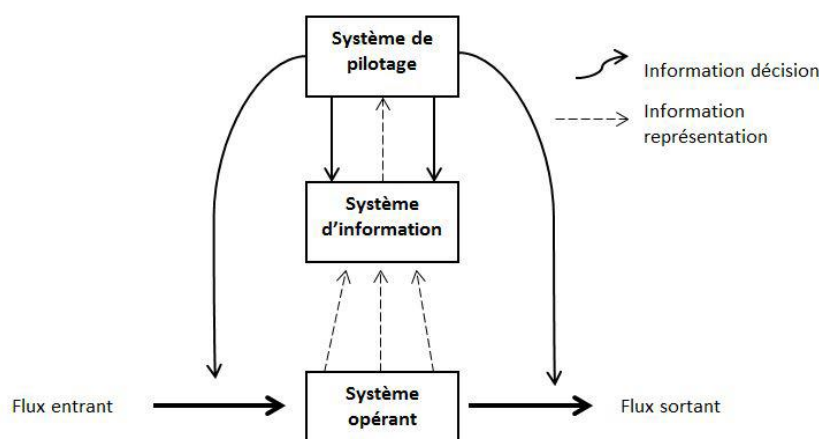


Figure 4.3 : Flux d'informations entre le système de pilotage et le système opérant (Trestini, 2016⁵⁷)

⁵⁵ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

⁵⁶ En effet, l'existence de perturbations, l'émergence de dynamiques nouvelles et les incertitudes contraignent à gérer les imprévus en continu et d'avoir une bonne représentation de la situation actualisée et future

⁵⁷ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

Tout cela permet de positionner l'apport sémantique des systèmes complexes pour l'intégration :

L'intégration peut être définie comme une dynamique particulière à piloter au sein du système d'enseignement

Dès lors que les caractéristiques des systèmes complexes en général sont établies, on peut imaginer appréhender, comprendre, se représenter, modéliser, prospecter et agir sur un système complexe. C'est d'ailleurs le principal objet du système de pilotage. Pour cela, différentes approches - dites systémiques - sont possibles. Cependant, l'une d'entre elles semble être plus synthétique et applicative, il s'agit de la démarche⁵⁸ systémique de Donnalieu et Karsky telle que présentée par Trestini. Cette démarche se décompose en trois étapes successives : la phase d'exploration au travers des trois axes fondamentaux⁵⁹ d'un système complexe, la phase de modélisation qualitative (avec la représentation des éléments, de leurs interactions, de leurs *découplages*⁶⁰ et des principaux flux opérants), et la phase de modélisation quantitative (par la formalisation de la modélisation qualitative) puis de simulation (avec l'introduction de la variable temporelle). La démarche systémique de Donnalieu et Karsky est davantage décrite à l'annexe 2.

La figure 4.4 résume les différentes étapes de la démarche systémique de Donnalieu et Karsky. On y découvre que chaque étape de la démarche est itérée de sorte à renforcer les étapes précédentes. On y apprend également que les principales finalités de cette démarche sont de renforcer la compréhension de l'objet du modèle, de prospecter son évolution et d'identifier des résultats imprévus.

La compréhension d'un système complexe en particulier n'est donc pas issue d'une définition, d'une description ou de manière plus générale d'une transmission, elle est issue d'une démarche proactive tout au long de laquelle la définition du système se profile, évolue, se précise, s'étend, etc. Il y a bien une différence fondamentale avec les systèmes analytiques qui se doivent d'être définis de manière univoque avant tout traitement possible (c'est le propre de l'analyse). On appelle les problèmes permettant ce type de traitement des problèmes « bien posés » ou « bien structurés », ils appellent naturellement une résolution analytique dans leur formulation.

⁵⁸ Une démarche n'est pas à proprement parler similaire à une approche. Elle est un processus défini, conçu pour construire une représentation du système étudié, et est spécifique à un système d'une nature identifiée. C'est en quelque sorte une « approche appliquée ». L'approche nécessite elle d'identifier cette nature en amont.

⁵⁹ Les principaux axes permettant d'explorer un système complexe sont : structurel pour ce que le système est, fonctionnel pour ce qu'il fait et historique pour ce qu'il était et devient. Plus de détails à l'annexe 2

⁶⁰ Le phénomène de découplage renvoie à une zone d'interaction faible ou dont la nature des interactions diffère du reste du système (à l'inverse du couplage) permettant d'identifier une frontière entre deux sous-ensembles, et par extension à identifier ces sous-systèmes.

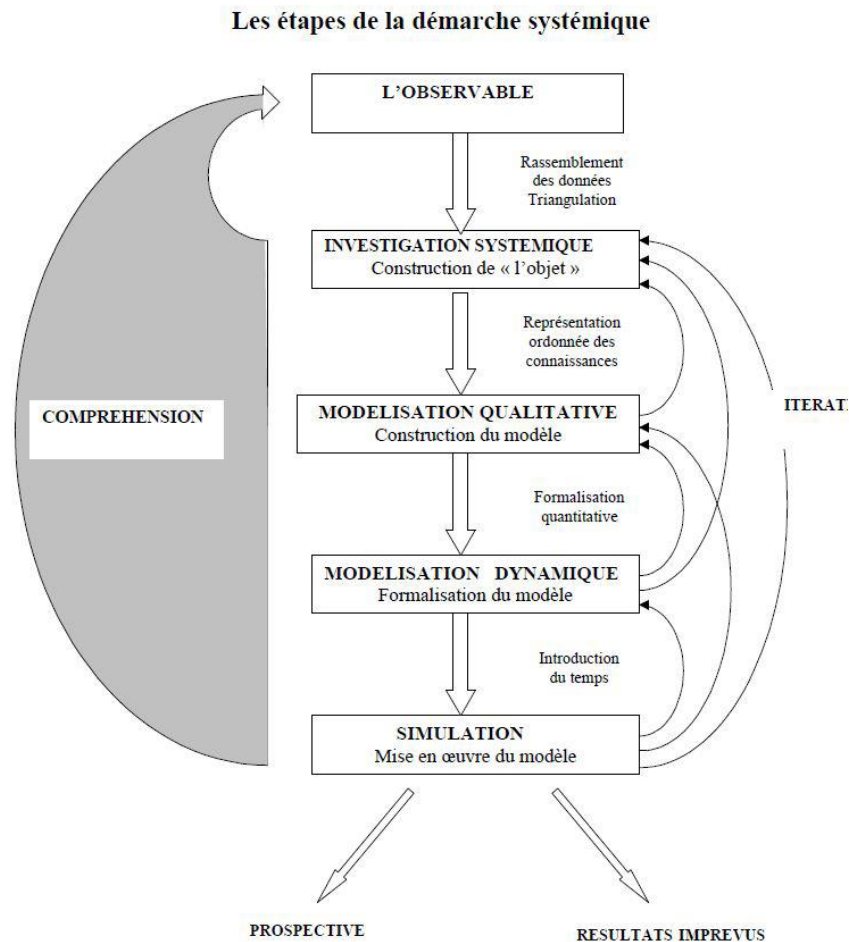


Figure 4.4 : Démarche systémique de Donnalieu et Karsky (Trestini, 2016⁶¹)

Garbolino et al., 2019⁶² approfondissent la distinction d'une approche analytique et systémique selon différents critères, décrits au tableau 4.1. Entre autres, l'approche systémique permet de mener la recherche interdisciplinaire, en ce qu'elle permet de mettre des éléments de nature différente (pris dans des sous-systèmes pouvant être découplés, et ayant des approches différentes) en relation. On peut également y observer l'existence d'une approche plus globale, centrée sur les effets et les objectifs.

⁶¹ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

⁶² Garbolino, E., Chéry, J.-P., Guarnieri, F., 2019. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools, in: Guarnieri, F., Garbolino, E. (Eds.), Safety Dynamics: Evaluating Risk in Complex Industrial Systems, Livres Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96259-7_1

Analytical approach	Systemic approach
Isolates	Unifies
Nature of interactions	Effects of interactions
Precise detail	Global perception
One variable at a time	Groups of variables
Reversible phenomena	Duration and irreversibility of phenomena
Validation by experimental proof	Validation through modelling and simulation
Precise and detailed models	Global templates
An efficient way to handle linear and weak interactions	An efficient way to handle nonlinear and strong interactions
Teaching by discipline	Multidisciplinary education
Detailed action programme	Action through objectives
Knowledge of details	Knowledge of goals

Tableau 4.1 : Différences entre une approche analytique et une approche systémique (Garbolino et al., 2019⁶³)

En résumé, les systèmes complexes sont des systèmes aux caractéristiques propres : une variété de composants en nature et en structure, un aspect ouvert et chaotique, une capacité d'auto-organisation et une tendance à l'homéostasie, l'émergence de nouvelles propriétés ou nouvelles dynamiques, et enfin la nécessité d'être piloté et non pas résolu. Un système complexe (de manière plus particulière) peut être appréhendé et compris au travers d'une approche proactive - dite systémique - au terme de laquelle on développe un modèle du système ; et dont les étapes d'exploration, de modélisation qualitative et quantitative, de simulation puis de prospective sont récursives et servent à renforcer la compréhension du système-objet. En cela, on parle d'*adéquation* du traitement car un modèle – nécessaire au pilotage d'un système – se différencie du système-objet par sa moindre complexité, et cette différence est représentative du degré d'incertitude avec lequel il est possible de piloter un système complexe. L'approche systémique vise donc à décomplexifier⁶⁴ le système-objet, non pas en en réduisant la complexité mais en augmentant celle du modèle, et donc du système de pilotage.

Tout cela permet de positionner le principal apport **quantitatif** des systèmes complexes concernant l'intégration :

Le pilotage d'un système complexe requiert d'adopter une démarche adéquate à sa complexité. La décomplexification de la tâche se joue donc sur la nature de l'approche, et pas sur les actions posées sur le système-objet.

⁶³ Garbolino, E., Chéry, J.-P., Guarnieri, F., 2019. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools, in: Guarnieri, F., Garbolino, E. (Eds.), Safety Dynamics: Evaluating Risk in Complex Industrial Systems, Livres Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96259-7_1

⁶⁴ La décomplexification renvoie à la finalité de l'approche systémique menée sur un système complexe. Elle ne correspond pas une action visant à réduire la complexité du système (ce qui serait le cas d'une approche analytique) mais à un processus de modélisation et de prospection de ce système, en vue de réduire les incertitudes qui s'imposent à son pilotage. Autrement dit, elle n'enlève pas de la complexité au système-objet mais en ajoute au système de pilotage.

4.2 Le système éducatif

A présent que les notions de système complexe et d'approche systémique ont été éclaircis, il est rendu possible d'identifier le système d'enseignement. Pour cela, le modèle d'activité d'apprentissage d'Engeström avec extension du pôle outil⁶⁵ (représentée à la figure 4.5), développé par Trestini, 2016⁶⁶ peut être utilisé.

On peut premièrement y observer la pyramide fondamentale « sujet-objet-outil » (en brun) décrivant l'activité en tant que telle : un sujet apprenant étudie un objet au travers d'un outil de transmission, de visualisation, de conceptualisation ou de représentation. Une première extension au sujet concerne les autres sujets participants à l'activité d'apprentissage ainsi que tous les autres membres de la communauté académique (professeurs, techniciens, chercheurs, assistants, responsables pédagogiques, etc.). Les extensions suivantes concernent les règles propres à l'organisation (dérivant de la nécessité à concilier le sujet avec le reste de la communauté) et la division du travail permettant à une partie de la communauté de travailler de manière séquencée sur un objet de recherche, sur l'apprentissage d'un sujet ou sur un outil. Cette dernière relation (entre membre du corps académique et outil) aboutit à la conception d'un ensemble d'*artefacts*, qui renvoient à un auxiliaire ayant pour vocation la médiation des relations entre l'apprenant, l'outil et le savoir. Les artefacts peuvent être d'ordre techniques (logiciels, matériel de laboratoire, etc.), pédagogiques (objectifs, déontologie, méthodes, etc.) et didactiques (contenu à transmettre, manière de le représenter, etc.). Ces artefacts permettent la diffusion effective du savoir jusqu'à l'apprenant, mais leur développement conjoint peut entraîner des *conflits instrumentaux*. Ces conflits sont le résultat de l'instrumentalisation : c'est-à-dire le placement d'un intermédiaire (outil) entre le sujet et l'objet d'apprentissage, et des incompatibilités entre artefacts qui composent l'outil.

⁶⁵ Ce modèle s'applique plus particulièrement dans le contexte d'un Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain, mais il rend bien compte de la complexité de l'activité d'enseignement

⁶⁶ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

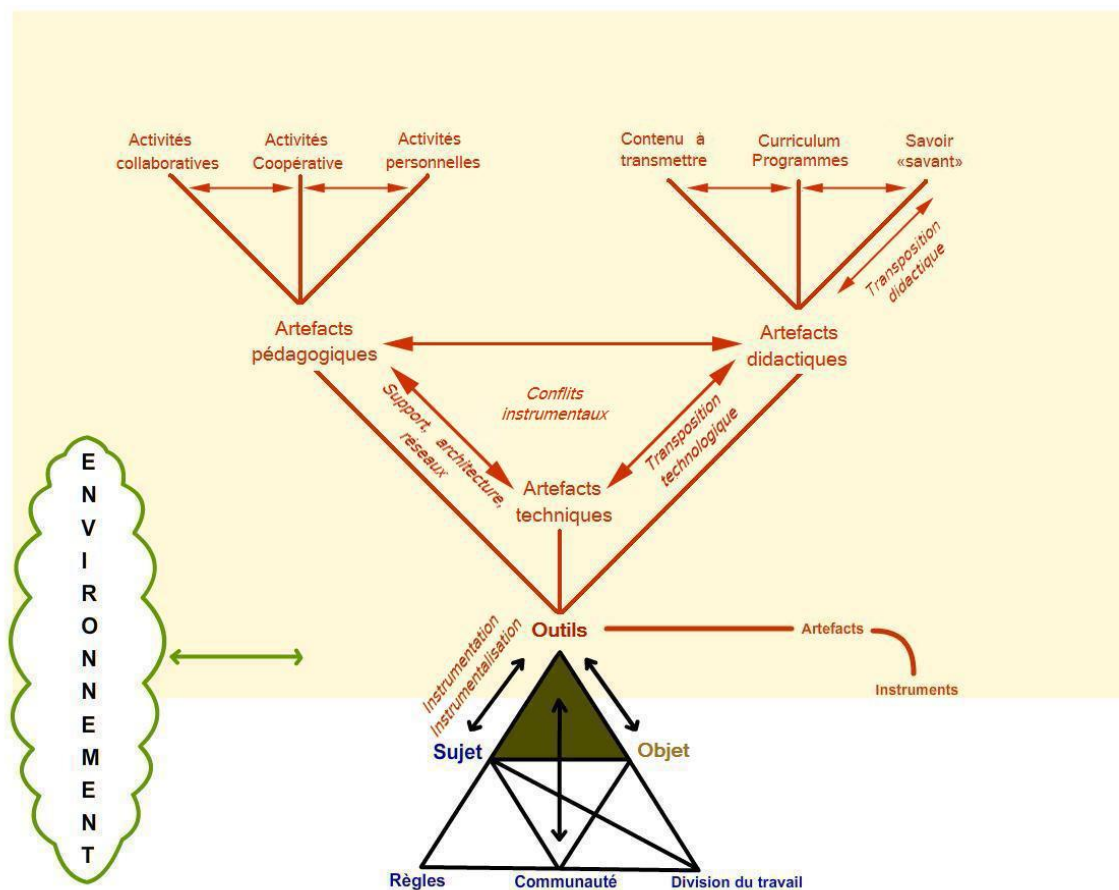


Figure 4.5 : Modèle d'activité d'apprentissage d'Engeström avec extension du pôle outil (Trestini, 2016⁶⁷)

Nous le verrons plus tard, ces conflits instrumentaux peuvent avoir des répercussions diverses au sein du système d'enseignement. Dans le cas présent de l'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs, ces conflits ont une manifestation homéostatique : c'est-à-dire qui s'oppose au changement, et *a fortiori* à l'intégration.

Cet état des lieux permet de constater que :

Le système d'enseignement est un système comportant une grande variété de composants en interaction, il est ouvert car en interaction avec son environnement, est capable d'auto-organisation et observe l'émergence de conflits instrumentaux : il rentre donc dans la définition d'un système complexe

Par ailleurs, comme décrit dans la section 4.1 « Les systèmes complexes et l'approche systémique », l'auto-organisation d'un système complexe lui permet de s'adapter à une augmentation de la complexité de son environnement, en augmentant sa quantité d'informations de Shannon en interne.

⁶⁷ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

Ceci permet de positionner le second apport **quantitatif** des systèmes complexes sur la complexité de l'intégration :

Si le système d'enseignement est un système complexe, que les enjeux à y intégrer sont eux-mêmes complexes, que le pilotage d'un système complexe requiert l'utilisation d'une approche adéquate, et que l'auto-organisation revient à augmenter la complexité interne d'un tel système : alors l'intégration est une opération de **création de complexité**.

Notons que cette création de complexité passe – entre autres – par la création de liens entre parties prenantes, par la constitution d'un système de pilotage, et par l'adoption d'une démarche interdisciplinaire et systémique, comme décrit aux chapitres 6 « Comment intégrer les enjeux de DD dans la formation des ingénieurs ? », 7 « Quelles sont les barrières à l'intégration ? » et 8 « Quels sont les leviers d'action ? ».

Il sera également décrit par la suite que la création de complexité est une condition nécessaire mais pas suffisante. Le pilotage nécessite en parallèle une **dimension qualitative** dans sa stratégie, avec une connaissance et une maîtrise des barrières et des leviers d'actions propres à l'intégration.

Pour résumer ce chapitre, les systèmes complexes sont de grands ensembles d'éléments en interaction, dont le comportement est incertain. Les dynamiques de ces systèmes ne peuvent pour ces raisons pas être résolues mais doivent être pilotées. Il est alors nécessaire - pour leur description, leur compréhension et leur prospection – d'adopter une approche systémique permettant de décomplexifier le système-objet. Si l'on particularise au système d'enseignement : des conflits instrumentaux émergent entre des artefacts de médiation techniques, pédagogiques et didactiques, et dérivent sur des mécanismes d'homéostasie. Le système d'enseignement est donc un système complexe. L'intégration d'enjeux complexes dans un système complexe ne peut par ailleurs se faire qu'au travers de la création de complexité. En définitive, les systèmes complexes sont des outils pertinents pour traiter la dimension quantitative de la dynamique d'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs, en plus de constituer un objet d'apprentissage pour les étudiants.

5. Quelle place pour chaque partie prenante ?

La notion de *communauté* dans le système d'enseignement a déjà été abordée au cours de la section 4.2 « Le système d'enseignement ». A priori, la communauté du système d'enseignement constitue une grande partie des composants de celui-ci (bien qu'il en existe d'autres : les infrastructures, les outils, les campus, le matériel, les ressources, etc.) ; mais c'est dans leur organisation, leur structuration, leur fonctionnement que les membres de la communauté rendent le système d'enseignement complexe. Cette communauté se compose de différents éléments ou sous-systèmes ayant des caractéristiques variables. La revue de littérature nous a permis de traiter les éléments au travers des catégories suivantes : *program's directors*, professeurs, chercheurs, étudiants, comité de pilotage et intervenants externes. Rigoureusement, il faudrait prendre en compte les techniciens, le personnel administratif, les organismes accréditeurs, financiers et pédagogiques, etc. mais la littérature ne nous a pas permis d'explorer suffisamment ces éléments pour les traiter ici.

Si ces catégories de parties prenantes sont distinguées, ce n'est pas juste qu'elles diffèrent en comportement ou en interactions avec les autres catégories, mais qu'un traitement adapté de chacune de ces parties prenantes est nécessaire. Pour cela, la littérature dispose d'études ayant été menées sur ces catégories spécifiquement, sur leur représentation du DD et de l'EDD, sur les obstacles auxquels ils font face du fait de leur fonction, sur leurs motivations, sur leurs rôles au sein d'un système d'enseignement intégré ou non, au cours du processus d'intégration, etc. Les résultats détaillés de ces études sont disponibles dans l'annexe 3 et sont ici exploités au tableau 5.1. Ce tableau se focalise sur l'état actuel de ces éléments, sur leurs rôles potentiels dans l'intégration et sur les pistes d'amélioration propres ou exogènes leur permettant de l'endosser.

Program's directors – PCD (Leifler et al., 2020⁶⁸)	
Etat actuel	Vision anthropocentrée du DD, dite de « durabilité faible » (cf. partie V.1 « Barrières sémantiques ») ; Principalement conditionnés par des motivations personnelles, peu de considération pour la dimension pédagogique ; Considèrent qu'ils n'ont pas la possibilité de répondre à des objectifs sociaux.
Rôle Potentiel	Rôle de leader.
Pistes	Décloisonnement disciplinaire ; Nouvelles règlementations ; Allocation de fonds pour développer de nouveaux contenus et se fournir des ressources adaptées.
Professeurs (Byrne et al., 2013⁶⁹)	
Etat actuel	Existence de « pensées de groupe », sensiblement conditionnées par la discipline de spécialisation ; Certains groupes excluent la dimension systémique et complexe, et réduisent le DD à des considérations technologiques et de ressources ; Existence d'un fatalisme dans les pensées de groupe proches du « business-as-usual ».
Rôle Potentiel	Rôle critique, ou de déclencheur ; Rôle de leader.
Pistes	Former les professeurs. Projets pilotes ; Elargissement des thématiques de DD ; Exploitation de l' « Effet d'entraînement ».

⁶⁸ Leifler, O., Dahlin, J.-E., 2020. Curriculum integration of sustainability in engineering education – a national study of programme director perspectives. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 21, 877–894. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-09-2019-0286>

⁶⁹ Byrne, E.P., Desha, C.J., Fitzpatrick, J.J., Hargroves, K. “Charlie,” 2013. Exploring sustainability themes in engineering accreditation and curricula. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 14, 384–403. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-01-2012-0003>

Chercheurs (Clarka et al., 2016⁷⁰)	
Etat actuel	Cloisonnement disciplinaire marqué.
Rôle Potentiel	Producteurs de « connaissances utilisables » en EDD.
Pistes	Prendre davantage en compte la complexité du système d'enseignement, ainsi que les dimensions adaptatives et politiques de ce système ; Apprentissage social et collaboratif avec davantage de parties prenantes extérieures.
Etudiants (Lourdel, 2005⁷¹)	
Etat actuel	Réceptifs.
Rôle Potentiel	Rôle évaluatif.
Pistes	Méthodes pédagogiques plus interactives.
Comité de pilotage (Hill et al., 2018⁷²)	
Etat actuel	Inexistant ou inefficace.
Rôle Potentiel	Rôle de pilotage de l'intégration.
Pistes	Se développer/ se former ; Concevoir des options de stratégies d'intégration ; Sensibiliser et engager la communauté universitaire ; Promouvoir l'intégration de la durabilité au sein des programmes ; Coordonner et soutenir les différentes parties prenantes dans leur implication et dans l'analyse de leurs résultats.
Intervenants externes (Hill et al., 2018⁷³)	
Etat actuel	Peu nombreux.
Rôle Potentiel	Rôle critique.
Pistes	Davantage de prise en considération au sein du système d'enseignement.

Tableau 5.1 : Résultats de la littérature sur la place de chaque partie prenante

⁷⁰ Clark, W.C., Kerkhoff, L. van, Lebel, L., Gallopin, G.C., n.d. Crafting usable knowledge for sustainable development. PNAS. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1601266113>

⁷¹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

⁷² Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. International Journal of Sustainability in Higher Education 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

⁷³ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. International Journal of Sustainability in Higher Education 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

Une précision peut cependant être donnée sur le comité de pilotage : l'article à l'origine des résultats pour cette catégorie parle d'un comité (« SLO committee ») s'étant formé à l'Université du Vermont⁷⁴. Le rôle de ce comité est de coordonner les différentes étapes et stratégies de l'université concernant l'intégration, et par extension les parties prenantes à ces stratégies. Sa conformation au sein des différentes parties prenantes est illustrée à la figure 5.1.

Il convient cependant de distinguer le *comité* du *système* de pilotage : le comité est une catégorie de parties prenantes, alors que le système de pilotage se compose de plusieurs catégories. La place du comité dans le système de pilotage est néanmoins présentée comme centrale.

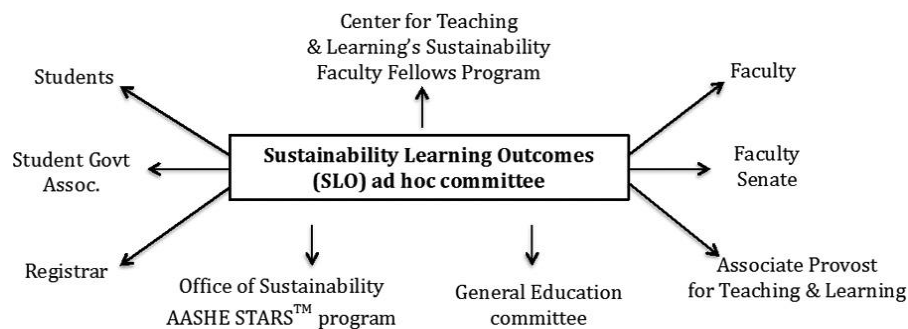


Figure 5.1 : Système de pilotage de l'intégration à l'université du Vermont (Hill et al., 2018⁷⁵)

Pour résumer ce chapitre, la littérature nous a permis de traiter le cas des catégories de parties prenantes que sont : les *program's directors* (PCD), les professeurs, les chercheurs, les étudiants, le comité de pilotage et les intervenants externes. Ces parties se situent dans un état actuel discontinu avec le rôle auquel leur fonction leur permettrait d'accéder et ainsi contribuer efficacement à l'intégration. De sorte à endosser ce possible rôle spécifique, des pistes d'amélioration existent. Ces pistes reposent principalement sur les dimensions sociale et psychologique du comportement des parties prenantes : décloisonnement disciplinaire, ouverture d'esprit, apprentissage social, méthodes pédagogiques, collaboration et considération des intervenants extérieurs, coordination de l'intégration, effet d'entraînement, etc. Ces dynamiques sociales et psychologiques sont au cœur du caractère complexe du système d'enseignement.

Les résultats de cette partie corroborent avec ceux de la précédente :

L'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs doit passer par davantage de liens/d'interactions entre parties prenantes, et donc s'accompagner de davantage de complexité sociale.

L'existence d'un système de pilotage est nécessaire pour mener l'intégration, du fait de son caractère complexe

⁷⁴ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

⁷⁵ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

6. Comment peut-on mettre en œuvre cet enseignement ?

Nous l'avons vu lors des parties précédentes, les systèmes complexes constituent un outil pertinent pour l'EDD, tant comme contenu de fond pour les étudiants que comme outil conceptuel à l'intégration (considéré comme une dynamique particulière à piloter) pour le système de pilotage. Cette décomposition peut cependant être approfondie : au niveau du changement dans le cursus de manière générale et vers quel type de cursus, avec des indications de la littérature concernant les méthodes pédagogiques pour l'EDD, au travers de retours d'expérience d'intégration et d'évaluation par les participants, et avec des formations à destination du corps enseignant.

Ce chapitre s'intéresse donc principalement à la conception des artefacts : didactique entre le savoir scientifique et la conception des cursus d'apprentissage (au travers de résultats sociologiques), pédagogique entre l'enseignant et l'apprenant (au travers de résultats épistémiques), et au niveau de la transmission didactique et technique de ces savoirs jusqu'aux sujets apprenants (au travers de résultats d'expériences et d'outils de formation des enseignants).

6.1 Le changement dans le cursus de l'étudiant ingénieur

La question du changement a déjà été abordée au chapitre 1 « Contexte » au travers du passage d'un paradigme positiviste à un paradigme constructiviste. Ce changement, en pratique, peut se matérialiser au travers de l'intégration du DD dans la formation des ingénieurs. Si l'on considère l'intégration comme une dynamique transitoire, il apparaît nécessaire de caractériser les attendus cette dynamique.

Pour Leifler et al., 2020⁷⁶, deux approches pour l'intégration du DD dans l'enseignement sont le plus souvent prises :

- Un focus analytique sur les conséquences de la technologie comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) ;
- Une transformation de l'enseignement au travers du management et de l'innovation technologique et sociale.

Cependant, selon les auteurs, ces deux approches sont insuffisantes en ce qu'elles n'induisent aucune transformation globale et risquent de faire perdre la légitimité des universités à former des ingénieurs capables de se confronter aux problèmes planétaires (et en particulier aux Problèmes Pernicieux de Durabilité - PPD) aux yeux des autres parties prenantes.

Entre autres, ces approches ne permettent pas :

- D'apprendre sur les objectifs planétaires fixés par les différents défis et tendances reliées (cf. section 3.2 « Rôle sociétal de l'ingénieur ») ;
- De traiter les normes et valeurs contradictoires inhérentes au développement durable (cf. section 7.1 « Barrières sémantiques ») ;

⁷⁶ Leifler, O., Dahlin, J.-E., 2020. Curriculum integration of sustainability in engineering education – a national study of programme director perspectives. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 21, 877–894. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-09-2019-0286>

- De développer une pensée systémique ;
- De passer au-delà des barrières disciplinaires.

Une autre vision stratifiée du paysage des stratégies actuellement appliquées est proposée par Linow et al., 2019⁷⁷, qui discutent de la transformation de l'enseignement vers l'EDD au travers de différentes propositions et qu'ils distinguent au travers de leur caractère *profond* dans cette transformation (de manière croissante) :

- La création d'un bachelier en sciences de l'environnement et de la durabilité : cela permet d'approfondir la formation d'un certain nombre d'étudiants mais n'a aucun effet sur le caractère business-as-usual des autres cycles de formation ;
- L'ajout de cours interdisciplinaires dans toutes les formations coorganisés par différents professeurs : cela est rendu possible si les professeurs en question ont suffisamment de compétences interpersonnelles ;
- L'introduction progressive de compétences systémiques au sein de cours existants : cela peut se faire à titre individuel pour un professeur, générer un *effet d'entraînement* et accorder du crédit à ces compétences ;
- La création d'un master en sciences de la durabilité accessible à partir de tous les bacheliers ;
- L'utilisation d'exemples liés au dérèglement climatique pour illustrer certains principes d'un cours.

Selon les auteurs, ces mesures ne suffisent cependant pas et doivent être accompagnées d'une vision de l'intégration de l'EDD à long terme. Ceci représente un enjeu plus complexe sur le long terme car le consensus sur les directives et sur le système de pilotage est hautement variable.

Plus encore, Lourdel, 2005⁷⁸ avance deux principaux résultats finaux de recherche concernant la dimension pédagogique de l'enseignement du DD aux ingénieurs :

- Le concept de Développement Durable ne peut être assimilé à une connaissance supplémentaire à acquérir, il correspond à une prise de conscience et à un **changement de paradigme** ;
- La modification des enseignements visant à **l'intégration du DD ne peut se faire au travers d'une simple implémentation de connaissances nouvelles**, elle nécessite une réflexion pédagogique, une innovation ciblée.

On ne parle donc pas d'implémentation mais bien d'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs. Le terme intégration revêt ici une dimension transformative avec un caractère profond, par opposition à une approche de surface. Par ailleurs, la gestion de l'intégration par un système de pilotage requiert un consensus dont l'instabilité peut affecter l'efficacité de l'intégration. Les résistances au changement et leur levée (homéostasie) constituent donc un enjeu majeur de l'intégration dans son caractère profond au sein du cursus de formation des ingénieurs.

⁷⁷ Linow, S., 2019. Integrating Climate Change Competencies into Mechanical Engineering Education, in: Leal Filho, W., Hemstock, S.L. (Eds.), Climate Change and the Role of Education, Climate Change Management. Springer International Publishing, Cham, pp. 33–51. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32898-6_3

⁷⁸ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Il peut en être déduit que :

La nature de l'intégration n'est pas additive, mais transformative pour le cursus de l'ingénieur.

6.2 Les méthodes d'enseignement

Des conflits instrumentaux ont pu être mis en évidence au sein de l'EDD, dont une partie sont des conflits d'ordre pédagogique. Ces conflits dérivent de l'application de méthodes d'enseignement inadaptées à l'EDD. Afin d'identifier ces inadaptations, il convient d'abord d'en préciser le cadre : les méthodes d'enseignement reposent en premier lieu sur des méthodes d'apprentissage. En d'autres termes, avant de se demander comment enseigner le DD, encore faudrait-il préciser comment on apprend sur lui.

Trestini, 2016⁷⁹ détaille les différentes méthodes d'apprentissage qui permettent aux étudiants d'*apprendre*. On entend par apprendre le fait de développer des *savoirs* (connaissances), des *capacités* (potentialités) et des *savoir-faire* (habiletés), et de faire en sorte que l'apprenant soit en mesure de les mobiliser au travers de *compétences* (capacité de porter un jugement de valeur dans un domaine dont on a une connaissance approfondie et de le mettre en œuvre habilement). Ce développement est donc l'objet des modèles d'apprentissage qui détaillent comment les savoirs, les capacités, les savoir-faire et les compétences émergent et comment on peut favoriser leur développement. Les modèles d'apprentissage dérivent ensuite sur diverses méthodes pédagogiques qui encadrent la pratique de l'enseignement de sorte à assurer un développement optimal de l'apprentissage.

On dénombre trois grandes formes de modèles d'apprentissage :

- Le modèle d'apprentissage *transmissif* : l'apprenant est un cerveau vierge est entièrement disponible qu'il s'agit de remplir avec des connaissances que l'enseignant possède ;
- Le modèle d'apprentissage *par renforcement* : l'apprentissage se fait au travers d'injonctions et de renforcements (positifs lorsqu'il y a récompense, et négatif lorsqu'il y a punition) ;
- Le modèle d'apprentissage *interactionniste* : l'apprenant tâtonne dans sa recherche d'informations, dont il a besoin pour un but précis, et se met en interaction avec des outils, des ouvrages ou d'autres individus susceptibles de l'éclairer. Une extension du modèle interactionniste est le modèle *connectiviste*, sensiblement similaire à ceci près qu'il présente l'apprentissage comme un phénomène naturellement émergent d'un suffisamment grand ensemble d'interactions.

Trestini décrit ensuite les différentes implications en termes d'outils qu'ont pu avoir ces différents modèles dans le domaine des Environnements Numériques d'Apprentissage (ENA). On y retrouve les contenus multimédias (vidéos, cours en ligne, etc.) dérivant de l'apprentissage transmissif ; la machine à enseigner de Skinner, les automates et l'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) dérivant de l'apprentissage par renforcement ; et les MOOC (Massive Open Online Course) et autres classes inversées dérivant de l'apprentissage connectiviste.

⁷⁹ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

Selon l'auteur, la complexité ne peut efficacement être représentée, modélisée, simulée et comprise qu'au travers de méthodes d'apprentissages dits connectivistes. Entre autres, il met en avant le degré d'interaction fort de l'activité d'enseignement avec d'autres : gestion administrative, conception et suivi de la formation de l'ingénieur, etc. Ce degré indique que la pratique de l'enseignement est déterminante dans le caractère complexe du système d'enseignement, et donc que les méthodes d'enseignement doivent être en adéquation avec des modes d'apprentissage complexes, fondamentalement connectivistes.

Cette thèse est en outre renforcée par l'enjeu du décloisonnement disciplinaire (émergence de *connexions* entre disciplines) décrit tout au long de ce rapport.

Selon Lourdel, 2005⁸⁰, les méthodes pédagogiques (permettant de concilier l'enseignement et l'apprentissage) sont diverses et il n'en est souvent exploité qu'une partie du potentiel. L'une des thèses principales de Lourdel décrit que l'éducation au développement durable ne peut se résoudre à l'implémentation de connaissances ou de programmes d'experts isolés mais nécessite une réflexion d'ensemble du cursus de l'étudiant. Il est ainsi décrit que les principaux atouts d'une méthode pédagogique pertinente pour cette intégration sont la réflexion systémique, l'approche multidisciplinaire, le développement de l'esprit critique, l'apprentissage de la complexité, l'ouverture d'esprit, la réflexion sur la société, l'éthique et les valeurs partagées. Ainsi, aucun de ces objectifs n'est efficacement développé par la pédagogie transmissive. Des alternatives sont néanmoins possibles :

- La *pédagogie active*. Elle se base sur le tâtonnement expérimental et expérientiel, sur la construction personnelle et progressive d'une réponse, sur la découverte et l'action, et sur la mise en situation. La pédagogie active a pour conséquences de stimuler l'autonomie, les initiatives, la motivation et la créativité des apprenants ;
- Le *travail en équipe* stimule le sens de l'objectivité, les capacités de communication et de dialogue, la motivation et la créativité, et enfin la pensée complexe. La mise en situation est également utilisée afin de confronter une équipe à la gestion de contradictions, d'incertitudes, de situations évolutives, et de réévaluation des objectifs. Elle permet le développement de capacité d'adaptation et d'autonomie ;
- Les *méthodes d'évaluation* font également partie des domaines susceptibles d'accueillir de l'innovation. En effet, le mode d'évaluation conditionne largement le comportement et les points d'attention des étudiants. L'auto-évaluation peut être une approche intéressante à ce titre.

Pour Lourdel, les objectifs pédagogiques permettant la conception d'un nouveau mode d'enseignement peuvent se résumer en :

- La prise en compte de la dimension évolutive du concept de développement durable ;
- L'introduction d'incertitudes ;
- La prise en compte des divergences de point de vue ;
- L'acquisition d'un mode de pensée systémique ;
- L'introduction d'une réflexion éthique ;
- L'introduction du principe de responsabilité ;
- Envisager le changement de paradigme ;

⁸⁰ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

- Transformer une notion théorique en une application pragmatique ;
- L'utilisation de méthodes pédagogiques innovantes comme les jeux de rôle.

Les quatre premiers objectifs ne sont pas sans rappeler les concepts développés dans la section 4.1 « Les systèmes complexes et l'approche systémique ». Les notions d'éthique et de responsabilité renvoient à la section 3.2 « Rôle sociétal de l'ingénieur ».

Pour résumer, les méthodes d'enseignement indiquées pour l'EDD sont largement conditionnées par les méthodes d'apprentissage adéquates à la complexité de l'EDD et par l'effort pédagogique mené dans ce sens. Les objectifs guidant cet effort sont principalement fixés sur la prise en compte de la complexité du DD et donc de l'EDD, sur l'application de principes éthiques, et sur l'innovation et le changement dans le cursus de formation de l'ingénieur. Cette dernière catégorie d'objectifs renvoie naturellement à la dynamique d'intégration, au sein de laquelle il s'agit d'intégrer la dimension pédagogique.

6.3 Les retours d'expérience

De nombreuses expériences d'intégration du DD ont été menées dans les universités du monde entier. Il apparaît qu'une grande diversité d'expériences et d'études associées existent dans la littérature. La figure 6.1 présente de manière non exhaustive cette diversité au travers des types d'expériences traités ici.

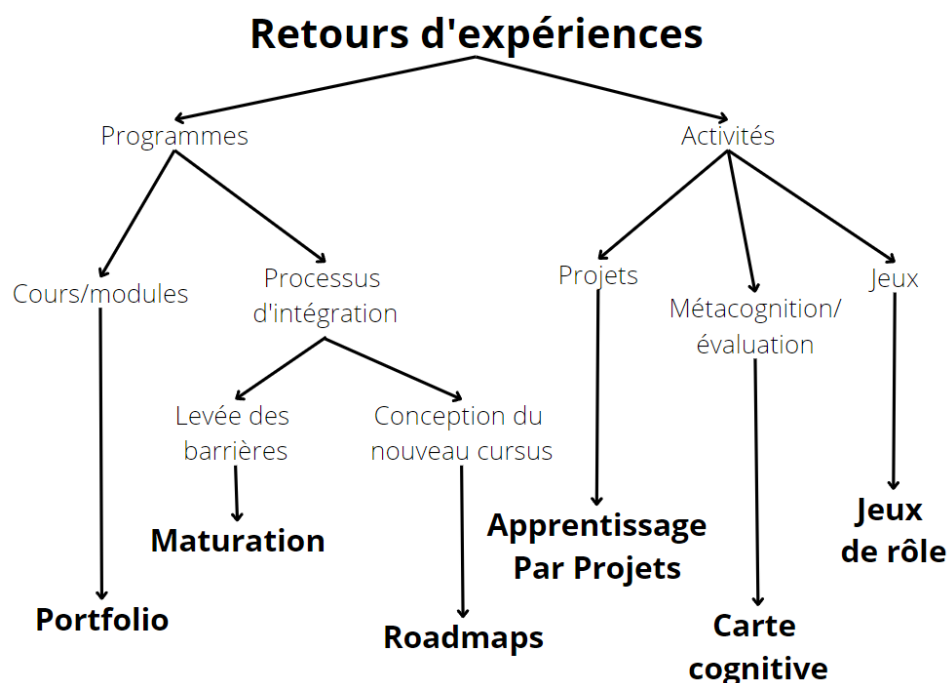


Figure 6.1 : Diversité des retours d'expérience et position des expériences présentées

Ces expériences ont pu être documentées, analysées et évaluées dans la littérature, et les études associées ont pu mettre en évidence un ensemble de résultats de confrontation entre les attendus de l'EDD et les observations. Cette section s'applique donc à positionner les objectifs de ces études et à en dégager les résultats : d'une part sur la pertinence de l'expérience pour l'EDD (en régime), et d'autre part sur les observations liées à l'intégration (en transitoire). La description des expériences en elles-mêmes ainsi que les résultats détaillés de ces expériences sont disponibles à l'annexe 4.

A titre d'illustration, l'expérience des *cartes cognitives* (cas particulier des cartes mentales) menée par Lourdel, 2005⁸¹ met en évidence qu'un outil d'évaluation des programmes d'EDD est nécessaire au pilotage de l'intégration des enjeux DD dans la formation des ingénieurs. La carte cognitive apparaît dès lors comme un moyen d'externaliser les connaissances acquises dans le contexte environnant des connaissances préalables d'un individu. Il est donc possible d'évaluer la pertinence d'une activité en comparant les cartes avant et après cette activité. L'effort de représentation constitue également pour l'apprenant un moyen de formaliser et retenir la construction mentale développée lors de l'activité. Il peut être désigné comme exercice de décomplexification. La carte cognitive s'inscrit dans le mouvement plus global dit de *métacognition* au sein duquel un individu réalise une représentation de sa propre cognition, et qui constitue un outil d'identification des connaissances d'un étudiant pour un enseignant. Notons que certaines cartes présentées dans ce rapport (ex. figure C.1) s'inscrivent dans cet exercice.

La figure 6.2 est un exemple de carte cognitive rédigée par un étudiant dans le cadre de l'étude de Lourdel.

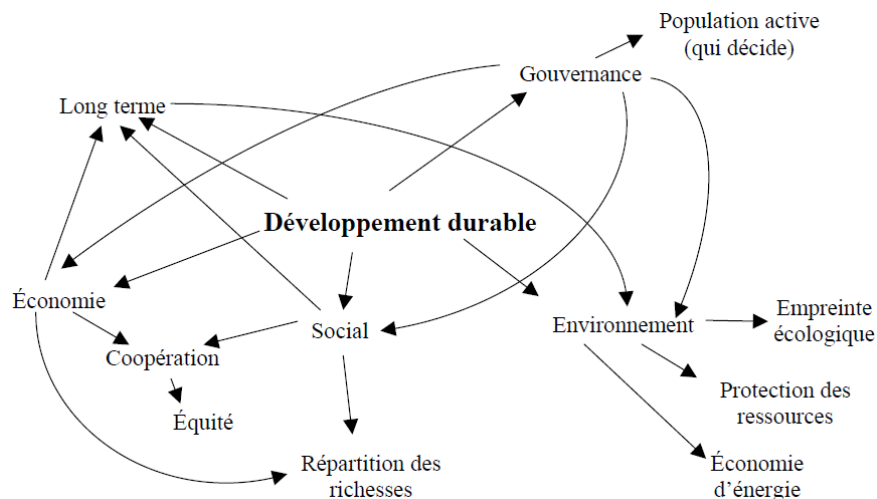


Figure 6.2 : Exemple de carte cognitive réalisée par un étudiant (Lourdel, 2005⁸²)

La figure 6.3, quant à elle, représente une décomposition et une évaluation en six axes selon la proportion et la richesse des termes et des liens utilisés dans une carte cognitive. Pour chaque axe, une gradation de son importance pour l'apprenant allant de 0 à 5 est réalisée par l'apprenant lui-même et par l'enseignant.

⁸¹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

⁸² Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

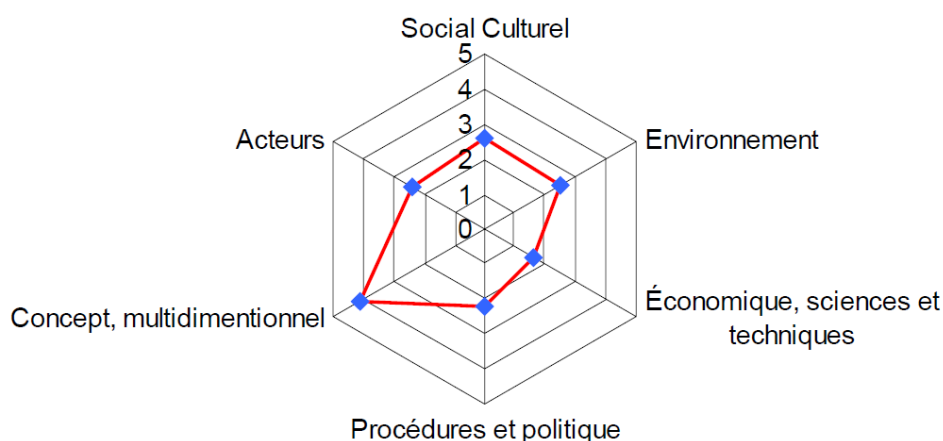


Figure 6.3 : Graphique d'évaluation d'une carte cognitive au travers des six axes principaux du DD (Lourdel, 2005⁸³)

Le tableau 6.1 détaille les objectifs et les résultats des études présentées ci-dessus.

Portfolio (Patel et al., 2005⁸⁴)	
Objectifs	Concevoir un programme d'EDD, dont les modules sont structurés en différents niveaux, et interconnectés entre eux.
Résultats	Les étudiants ont globalement appris plus rapidement au fur et à mesure que les discussions étaient ressourcées, challengeantes et engageantes ;
Sur l'EDD	Les étudiants ont noté un certain nombre d'informations et de réflexions qui leur sont utiles au présent et possiblement à l'avenir dans leur métier.
Résultats sur l'intégration	Une adaptation des modules au niveau de connaissance des étudiants est importante et a surtout été menée avec succès pour le niveau d'introduction ; Les participant au module d'introduction ont noté que le contenu de ce module était semblable à n'importe quel autre cours.
Maturation (Hill et al., 2018⁸⁵)	
Objectifs	Mettre en place différentes stratégies pour piloter l'intégration et faire murer l'EDD après cette phase d'intégration.
Résultats sur	Les résultats issus des actions les plus critiques du pilotage ont été : La conception réfléchi du programme, y compris la structure et l'ordonnement

⁸³ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

⁸⁴ Paten, C.J.K., Palousis, N., Hargroves, K., Smith, M., 2005. Engineering sustainable solutions program: Critical literacies for engineers portfolio. International Journal of Sustainability in Higher Education 6, 265–277. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370510607232>

⁸⁵ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. International Journal of Sustainability in Higher Education 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

l'intégration	<p>des exigences ;</p> <p>Les mécanismes d'évaluation enclenchés à un moment opportun ;</p> <p>Le positionnement de la supervision par le corps professoral ;</p> <p>Au fur et à mesure de l'intégration des enjeux de DD dans le cursus d'enseignement, le comité de pilotage était en mesure d'argumenter avec les membres de commission les plus sceptiques, au regard de leurs résultats et au travers des compétences interpersonnelles que le comité a acquis lors du processus d'intégration (c'est un exemple concret de l'effet d'entraînement).</p>
Roadmaps (Rodriguez et al., 2018⁸⁶)	
Objectifs	Mettre en place des activités stratifiées de conception d'un programme d'EDD.
Résultats	Efforts à mettre en place :
Sur l'EDD	<p>Le développement d'une sensibilité et d'une conscience au DD ;</p> <p>La transformation du comportement des étudiants en propagateurs des connaissances liées au DD.</p>
Résultats sur l'intégration	<p>Moyens d'y parvenir :</p> <p>L'élaboration d'une pensée critique et de compétences d'argumentation ;</p> <p>La résolution en interne de problèmes environnementaux au travers de modèles de management durable.</p>
Apprentissage Par Projets (APP) 1 (Vemury et al., 2018⁸⁷)	
Objectifs	<p>Développer chez les étudiants des connaissances et des compétences appliquées afin de développer une solution viable à un problème donné.</p> <p>L'université de Newcastle propose une série de lectures préalables au projet d'APP permettant aux étudiants de s'organiser, de prendre un maximum de dimensions en compte et de cadrer le travail ;</p>
Résultats	Un suivi régulier par des assistants et sur demande des étudiants, et le choix d'objectifs précis sont également mis en place le long de la réalisation du projet. Les membres de l'équipe de pilotage ont noté l'impact significatif de cette procédure de suivi sur la qualité des résultats. L'évaluation du projet est complétée par les étudiants (auto-évaluation) et par des professeurs et experts invités à leur présentation.
Sur l'EDD	

⁸⁶ Rodriguez-Andara, A., Río-Belver, R.M., Rodríguez-Salvador, M., Lezama-Nicolás, R., 2018. Roadmapping towards sustainability proficiency in engineering education. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 413–438. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0079>

⁸⁷Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>

Apprentissage Par Projets (APP) 2 (Guerra, 2017⁸⁸)	
Objectifs	Apprendre aux étudiants à traiter un problème de durabilité « mal structuré ».
Résultats	Les compétences les plus importantes à développer chez les étudiants sont :
Sur l'EDD	<p>La métacognition ;</p> <p>La pensée critique et systémique ;</p> <p>Le travail collectif ;</p> <p>La prise de décision et la gestion de problèmes ;</p> <p>La flexibilité, l'adaptabilité ;</p> <p>Les connaissances sur la durabilité, ses outils et ses représentations ;</p> <p>La recherche d'expertise technique.</p>
Résultats sur l'intégration	<p>Les principaux défauts attribués à l'APP comme pilote de l'intégration sont :</p> <p>La médiation insuffisante de la conflictualité entre les concepteurs du programme et les décideurs pour le cursus existant ;</p> <p>Le manque de cadre apporté par les encadrants ;</p> <p>Le défi d'équilibrer les dimensions économiques, environnementales et sociales ;</p> <p>Un dialogue interdisciplinaire limité ;</p> <p>La présence limitée de la durabilité en tant que telle.</p>
Jeux de Rôle (Lourdel, 2005⁸⁹)	
Objectifs	Apprendre les difficultés liées à la gestion des relations entre parties prenantes dans un projet de DD.
Résultats	Les difficultés rencontrées par les étudiants ont été la gestion d'une grande quantité d'informations, la prise de position en parallèle avec l'ouverture, la mise en place d'une bonne organisation et d'une équitable répartition des rôles, et la gestion du conflit ;
Sur l'EDD	Certaines notions du DD ont été négligées, comme l'équité, la prise en compte des besoins des acteurs faibles du DD, la gouvernance et l'écologie. Entre autres, il a été remarqué que les dimensions techniques ont systématiquement été priorisées, au détriment des dimensions plus globales.
Résultats sur l'intégration	Tant les étudiants que les organisateurs se sont rejoints pour dire que le jeu de rôle est une bonne manière de se confronter aux difficultés liées au DD, là où elles apparaissent bien plus faciles lors d'un cours, même dédié.
Carte Cognitive (Lourdel, 2005⁹⁰)	

⁸⁸ Guerra, A., 2017. Integration of sustainability in engineering education: Why is PBL an answer? International Journal of Sustainability in Higher Education 18, 436–454. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2016-0022>

⁸⁹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Objectifs	Représenter sa propre cognition / compréhension d'un concept, et notamment celui de DD.
Résultats Sur l'EDD	<p>Les points d'intérêt de la carte cognitive et de son évaluation par un graphique en six axes sont :</p> <p>La possibilité de réaliser des évaluations de groupe autant que des évaluations individuelles sur le DD ; L'identification du profil cognitif de chaque participant ainsi que de son rapport à la complexité ; La possibilité d'identifier chez eux des lacunes et des points forts ; La possibilité d'identifier des préoccupations/pensées de groupe ;</p> <p>La mise en perspective de l'évaluation d'un professeur sur le travail d'un étudiant par rapport à son auto-évaluation.</p>
Résultats sur l'intégration	<p>Les cartes cognitives permettent des rétroactions sous forme d'évaluations à la dynamique d'intégration (et permettent d'augmenter les flux de représentation du système d'enseignement vers le système de pilotage) :</p> <p>La mise en perspective des connaissances avant et après une activité permet d'identifier la pertinence de cette activité pour un groupe donné.</p>

Tableau 6.1 : Résultats des retours d'expériences

Pour résumer cette section, on peut avancer que les retours d'expériences ont pu mettre en avant deux types de résultats : les avantages et inconvénients d'un outil pour l'EDD en général, et les bonnes pratiques liées au pilotage de l'intégration. Sur l'EDD, certains résultats mettent en avant l'importance de la conscience/sensibilité, de la pensée critique, de la réflexion et de l'engagement ; d'autres résultats mettent en avant des difficultés de travail de groupe, de gestion de conflit, de gestion d'une grande quantité d'informations, etc. Sur l'intégration, des mécanismes de rétroactions sont mis en évidence au travers – principalement – de l'évaluation (par l'enseignant ou l'apprenant, sur le contenu ou sur le module), et permettent un pilotage alimenté en flux d'informations de représentation. Aussi, les outils d'EDD basés sur la médiation d'intérêts entre parties prenantes permet de mettre d'emblée en évidence les difficultés liées à l'EDD et à la dynamique d'intégration.

6.4 Les outils de terrain pour former les professeurs

Lors du chapitre 5 « Quelle place pour chaque partie prenante ? », les résultats avaient déjà mis en évidence la piste d'amélioration que constitue la formation en continu des professeurs. D'autres études en sont arrivées à cette conclusion et font état des nombreux outils à destination du corps enseignant des universités, permettant leur formation sur le domaine de l'EDD.

⁹⁰ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Mulà et al., 2017⁹¹ prennent l'exemple de l'initiative « University Educators for Sustainable Development (UE4SD) », dirigée par l'Université de Gloucestershire au Royaume-Uni, qui a accompagné 53 universités et autres partenaires européens dans cette transition et qui a répertorié les méthodes d'enseignement ainsi que les principaux résultats de l'initiative.

Il en ressort que les efforts sur le corps enseignant des projets de transition de l'enseignement pour l'EDD ont souvent été menés pour améliorer la pratique de l'enseignement. Là où le besoin actuel des universités envers leurs professeurs se situe plus dans la conception d'une orientation stratégique du système universitaire au travers, entre autres, de :

- Comprendre comment de nouvelles pédagogies pourraient être appliquées dans différents domaines/disciplines professionnelles ;
- Faire le lien entre les pédagogies d'éducation au développement durable et les contenus spécialisés enseignés ;
- Redéfinir ce à quoi pourraient ressembler des résultats d'apprentissage de qualité dans une optique d'EDD ;
- Repenser l'évaluation des progrès et des réalisations des élèves ;
- Remettre en question les relations de pouvoir dans l'apprentissage et faire participer les élèves à tous les niveaux de la dynamique d'apprentissage ;
- Assimiler comment la pensée et la pratique du développement durable s'articulent dans différentes industries/professions ;
- En apprendre davantage sur la façon de réaliser des changements éducatifs dans les établissements.

Les auteurs décrivent pour cela l'importance de former les enseignants à l'EDD et renvoient à des ressources destinées à cet effet, comme le « UE4SD Leading Practice » (<https://www.iau-hesd.net/documentation/2660-leading-practice-publication-professional-development-university-educators>). De nombreux autres outils de formation des enseignants y sont listés et sont disponibles à l'annexe 5.

Sur base d'expérimentations pédagogiques, également réalisées dans le cadre de UE4SD, les parties prenantes ont pu délivrer un ensemble de constats que les auteurs ont synthétisé au tableau 6.2. Cette figure met en évidence la nécessité de changer le positionnement de l'EDD, de la pratique de l'intégration et des objectifs de la formation des professeurs. Entre autres, on constate que les efforts sont ciblés sur la plus ample mise en relation des parties prenantes entre elles, sur le décloisonnement disciplinaire et sur l'apprentissage social. Si l'on rapporte ce constat aux résultats du chapitre 4 « Qu'est-ce qu'un système complexe ? », ceci revient à générer davantage de complexité sociale.

⁹¹ Mulà, I., Tilbury, D., Ryan, A., Mader, M., Dlouhá, J., Mader, C., Benayas, J., Dlouhý, J., Alba, D., 2017. Catalysing Change in Higher Education for Sustainable Development: A review of professional development initiatives for university educators. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 18, 798–820. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-03-2017-0043>

Changes from ...	To ...
One-shot professional development workshops in ESD	Ongoing professional development opportunities and mentoring support that actively engages the educator in critical reflection and action
Methods based on individual and personal change	Methods that support social learning and change
Targeting university educators only	Targeting senior and middle managers too
Developing specialist knowledge in sustainable development	Building academic leadership skills and transformative capabilities
Building disciplinary expertise in ESD	Transcending specialist expertise by crossing disciplinary boundaries and working with others
Strengthening academic identities	Developing new academic identities
Integrating ESD in the curriculum	Driving innovation in the curriculum
Transforming the teaching practice	Engaging in whole-institutional changes and organisational learning
Enhancing student learning and experience	Empowering learning at all institutional levels

Tableau 6.2 : Principales leçons retenues des expériences menées dans le cadre de UE4SD (Mula` et al., 2017⁹²)

Pour résumer ce chapitre, il apparaît dans la littérature que divers angles d’approche sont possibles sur la question stratégique et opérationnelle de l’intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs. Tout d’abord, si l’on perçoit l’intégration comme un processus de transition/ de changement, plusieurs auteurs soutiennent l’idée selon laquelle un changement en profondeur est nécessaire pour intégrer adéquatement (et de manière durable) le DD au sein de ce système. Cela signifie que l’intégration ne se cantonne pas à l’implémentation de connaissances nouvelles mais requiert une dimension transformative du système d’enseignement. Pour cela, une réflexion sur les méthodes pédagogiques a mené à mettre en avant certains objectifs pédagogiques précis, principalement atteints au travers des méthodes d’enseignement dites connectivistes. Sur le plan pédagogique mais aussi didactique, certains retours d’expériences ont ensuite permis de mettre en avant des résultats, issus d’expériences d’intégration : sur l’EDD en général (en phase de régime) mais aussi sur la dynamique particulière de l’intégration (en phase transitoire). Ces réflexions d’ordre pédagogique ont ensuite mené à approfondir la dynamique inhérente à l’intégration que constitue la formation des professeurs à l’EDD. Tous ces résultats tendent à guider/orienter les efforts d’intégration en agissant sur la conception des artefacts.

Il est donc possible d’en déduire, sur le plan **qualitatif** :

La dimension qualitative de l’intégration se base en premier lieu sur la conception des artefacts pédagogiques, didactiques et techniques permettant un apprentissage efficace. Les apprenants peuvent être des étudiants mais également des professeurs.

⁹² Mulà, I., Tilbury, D., Ryan, A., Mader, M., Dlouhá, J., Mader, C., Benayas, J., Dlouhý, J., Alba, D., 2017. Catalysing Change in Higher Education for Sustainable Development: A review of professional development initiatives for university educators. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 18, 798–820. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-03-2017-0043>

7. Quelles sont les barrières qui s'opposent à l'intégration ?

Lors de la section 4.1 « Système complexe et approche systémique », il était décrit que toute action au sein d'un système complexe génère des *résistances*, menant à terme à la stabilisation du système à son état initial (homéostasie). Dans la littérature scientifique concernant l'EDD, le terme de *barrières* est plus souvent employé pour désigner les mécanismes d'homéostasie du système d'enseignement. En effet, le terme barrière peut être étendu à des mécanismes non quantifiables et de natures très différentes, ce qui n'est pas rigoureusement le cas du terme de résistance. Notons que les termes obstacles et freins sont en bonne approximation similaires.

Jusqu'ici, nous avons déjà pu identifier des dynamiques nécessaires à l'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs : changement en profondeur dans le cursus de formation, formation des professeurs, prise en compte et mise en relation des parties prenantes entre elles, réflexion pédagogique, rôle potentiel et dispositions ad hoc des parties prenantes, etc. Ces dynamiques, dans leur caractère nécessaire, pourraient représenter des barrières lorsqu'elles sont absentes ou insuffisantes ; ce n'est rigoureusement pas le cas puisque leur insuffisance se manifeste au travers du renforcement de barrières plus fondamentales. L'insuffisance de dynamiques inhérentes à l'intégration n'est par ailleurs pas de la nature des barrières (identifiées aux *résistances* des systèmes complexes) mais des *états* et des *forces* s'exerçant au sein du système d'enseignement ; elles existent donc en amont des barrières.

Trois grandes catégories apparentes de barrières s'adressent à l'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs : les barrières sémantiques (de quoi parle-t-on ?), les barrières à l'*innovation* (comment peut-on mieux faire ?), et les barrières à l'*adaptation* (comment peut-on agir de manière pertinente face aux contraintes ?)⁹³.

7.1 Barrières sémantiques

Lourdel, 2005⁹⁴ avance des difficultés sémantiques liées à la compréhension des termes « Développement », « Durable » et leur conjonction en « Développement Durable ». En effet, ce terme n'est pas toujours défini ou même traduit de manière univoque.

Historiquement, le concept de Développement Durable est issu d'une réconciliation entre les considérations économiques de développement et les considérations environnementales et sociales de durabilité. Ainsi le terme n'est pas initialement destiné à exprimer une idée nouvelle que le langage n'aurait pas encore permis d'exprimer, mais à induire une idée sur base d'un intérêt à cette réconciliation.

⁹³ Lorsque les contraintes succèdent à la volonté de changement, on peut parler d'innovation (et à fortiori de barrières à l'innovation). A l'inverse, l'adaptation désigne un changement qui succède à la réception de contraintes. Bien qu'il n'existe pas de consensus sur le caractère innovatif ou adaptatif du système d'enseignement face à l'aggravation des contraintes environnementales et sociales ; l'une et l'autre approche apportent des procédures complémentaires.

⁹⁴ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Ce terme n'étant pas issu d'une nécessité de s'exprimer, il peut recouvrir plusieurs significations selon l'intérêt que son utilisateur a de le mettre en avant :

- L'acception la plus répandue de la durabilité est dite « faible » dans la mesure où elle place l'économie comme le contexte dans lequel s'opèrent les transformations environnementales et sociales. Cette acception repose sur *l'hypothèse néo-classique de l'environnement*, selon laquelle les ressources naturelles peuvent être substituées en un capital économique sans détérioration de sa valeur ; et selon laquelle une croissance infinie de l'économie est permise par le progrès scientifique et technique (c'est le principe de *croissance infinie*). Cette hypothèse est largement critiquée, notamment au travers du fait qu'elle ignore les irréversibilités des transformations que l'homme opère sur le système environnemental ;
- Si à l'inverse, d'une part, l'on est plus facilement sensible à des considérations environnementales et que, d'autre part, on considère que toutes les transformations économiques et sociales se déroulent dans le contexte de l'environnement naturel ; alors on défendrait une conception de la durabilité dite « forte ». Les ressources et l'énergie fournie par l'environnement permettraient toutes les transformations économiques et sociales opérantes. Cette acception de la durabilité forte est aussi critiquée dans la mesure où elle constitue une entrave au progrès technologique. L'auteur précise cependant que cette critique n'est pas valide dès lors que l'on intente à la technologie la seule capacité à provoquer le progrès. Selon elle, cette critique provient d'une mécompréhension de la science et d'un attachement irrationnel à la technologie ;
- Dans une dernière acception de la durabilité, dite « humaniste » ou « socio-centrée », on considère la dimension sociale comme centrale et englobante des transformations économiques et environnementales. Ses défenseurs mettent généralement en avant l'aspect déterminant du processus politique au sein duquel la prise de décisions est opérée sur les transformations environnementales et économiques.

Malgré qu'aucune de ces acceptions ne soit hégémonique dans les utilisateurs du terme de développement durable, il apparaît qu'aucune ne soit en mesure de refléter la définition moderne du terme se voulant plus générale. La figure 7.1 représente le “cube socio-économico-environnemental” au sein duquel toutes ces acceptions sont représentées au travers de coordonnées.

L'approche dite « globale » du développement durable y est représentée aux coordonnées (1,1,1) et est souvent présentée comme la plus consensuelle. La figure 7.2 représente cette approche et introduit les notions de viabilité, vivabilité et équité par le respect simultané de deux des trois principales dimensions.

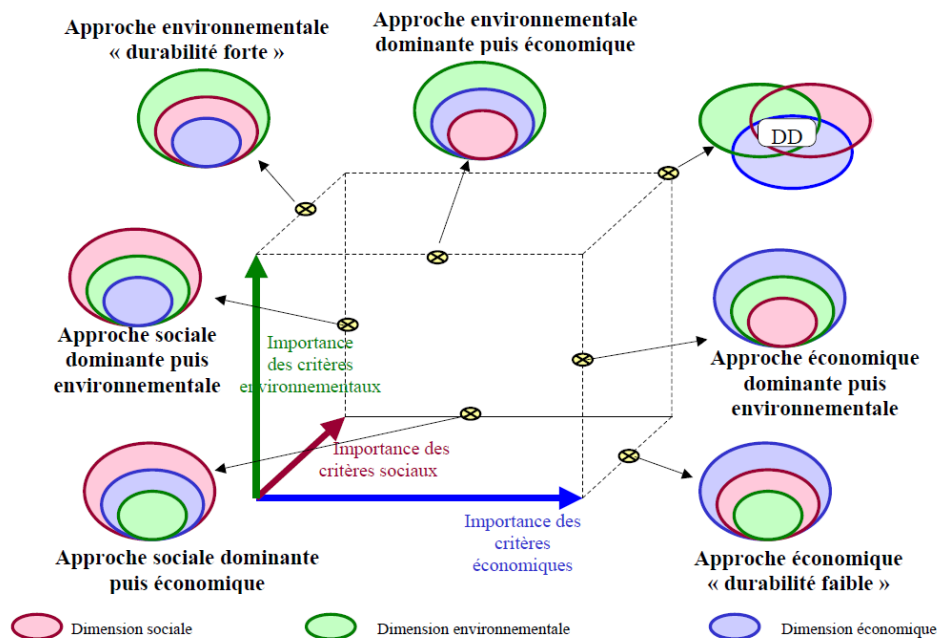


Figure 7.1 : Cube socio-économico-environnemental (Lourdel, 2005⁹⁵)

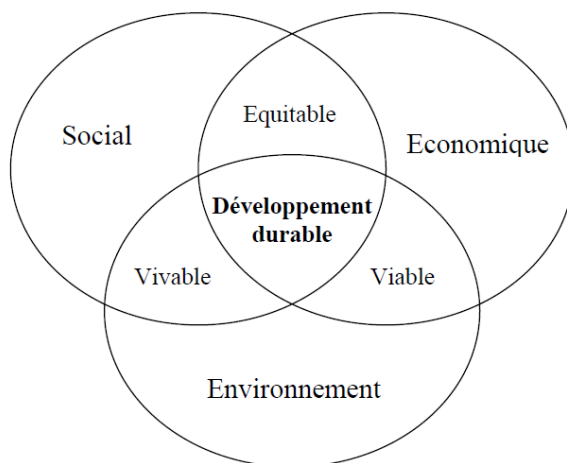


Figure 7.2 : Acceptation de la durabilité globale (Lourdel, 2005⁹⁶)

Cette acception n'en reste pas moins critiquée dans la mesure où :

⁹⁵ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

⁹⁶ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

- Si on la comprend de manière *réductrice*, on pourrait croire à une simple *superposition*⁹⁷ des trois concepts de société, d'environnement et d'économie ; là où le concept de développement durable est une construction complexe sur base de ces trois fondements ;
- Cette acception ressemble plus à un aide-mémoire qu'à un véritable guide pratique dans la réalisation de projets concrets ;
- Elle néglige la difficulté que représente l'élaboration d'une compréhension communément partagée de la durabilité dans une société aux intérêts très diversifiés ;
- Même une compréhension profonde de l'histoire et des différentes acceptions et hypothèses sous-tendues au concept de durabilité ne permettent pas de le définir univoquement ;
- La culture joue également le rôle de prisme au travers duquel on interprète la durabilité très différemment dans le monde. Le travail des ingénieurs du XXI^e siècle se mondialisant de plus en plus, cette dimension culturelle ne peut être négligée, surtout si le projet est mené dans un pays en voie de développement.

De manière plus générale, le contexte de mondialisation pose également le problème d'une déviation sémantique lors de la traduction. De l'anglais au français, le terme « sustainable development » ou « sustainability » est majoritairement utilisé en anglais mais peut se traduire de différentes manières. Si la traduction en « développement durable » ou en « durabilité » en est la principale, on peut également le traduire par « soutenable » ou « viable » selon le contexte. Le terme « governance » se traduit ainsi mieux en « gestion administrative et juridique ». Du français à l'anglais, le mot « rationnel » dans le domaine du DD peut être mieux traduit par « sound ».

D'autres barrières sémantiques, plus techniques, existent au sein du développement durable : le terme est inscrit dans un contexte de haute complexité avec la conciliation d'intérêts globaux et locaux, court- et long-termistes, idéaux et pragmatiques, etc. Non seulement le développement durable ne se positionne pas sémantiquement en faveur d'un pôle de chacun de ces dualismes, mais il nécessite en plus de les concilier. Le contexte fait également état de paradoxes, notamment au niveau de rapports de force entre des acteurs « forts » et « faibles » selon leur capacité d'expression et d'action, en asymétrie avec leurs besoins, comme décrit à la figure 7.3.

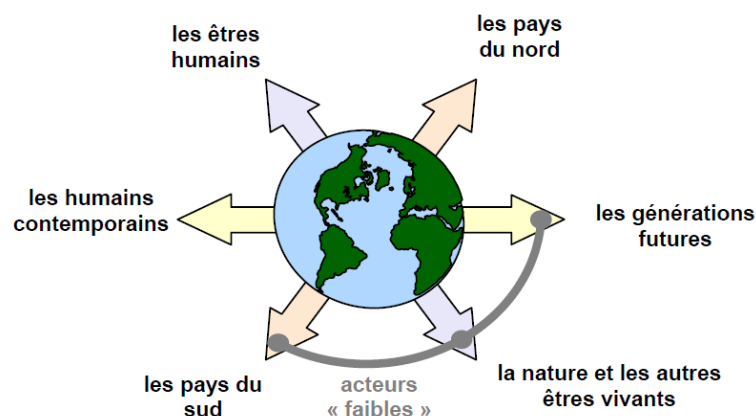


Figure 7.3 : Paradoxes de rapports de force entre acteurs dits « forts » et « faibles » (Lourdé, 2005)

⁹⁷ Le principe de superposition est au fondement de la logique réductionniste. Il permet de réduire le comportement d'un système à la superposition des comportements de ses éléments constitutifs. Ceci va à l'encontre du principe de totalité des systèmes.

Lourdel avance également que les barrières posées aux étudiants se posent également aux enseignants. Ces derniers sont cependant soumis à des barrières spécifiques. En effet, au-delà de barrières liées à l'intégration du DD dans des projets, de nombreuses barrières sémantiques se posent aux enseignants sur le plan pédagogique. Des retours d'expérience ont pu mettre en évidence quelques difficultés :

- « *Le concept est trop abstrait, trop distant de la réalité, trop théorique ;*
- *Le concept est trop large ;*
- *Ses implications sur la vie personnelle ne sont pas suffisamment mises en avant ;*
- *Les ressources et coûts nécessaires pour le mettre en place ;*
- *Les difficultés administratives pour le mettre en place ;*
- *La structure cloisonnée en départements, la rigidité empêche les initiatives interdisciplinaires ;*
- *L'idée selon laquelle cette thématique n'a pas de base scientifique car elle ne se rattache pas à une discipline préexistante ;*
- *Le développement durable est une thématique trop récente ;*
- *Le concept est pour certain « une mode ».*

Bien que ces auteurs considèrent que ces arguments soient pour la plupart basés sur des idées fausses, ils n'en demeurent pas moins de réels obstacles. » (Lourdel, 2005)⁹⁸

Ces barrières ont eu de nombreuses conséquences sur le système éducatif élargi. Dans un premier temps, on peut mettre en évidence les objectifs mis en avant à l'international et plus particulièrement par l'Agenda 21 : *“renforcer la coopération internationale pour la mise en commun de pratiques, de politiques et de programmes novateurs d'éducation pour le développement durable”*. Or, aujourd'hui, si beaucoup d'universités déclarent leur intention de prendre en compte ces enjeux, leur intégration effective est encore très limitée. Lourdel constate que *“Trop souvent l'éducation au développement durable est encore assimilée à l'éducation à l'environnement. La dimension sociale, économique, la vision à long terme et la transdisciplinarité sont souvent occultées ou très légèrement abordées. La plupart des exemples de formations ou sensibilisations actuellement disponibles le confirment.”* En cause : ces différentes barrières sémantiques, mais aussi dans une moindre mesure la rigidité des systèmes éducatifs, le cloisonnement disciplinaire, l'administration traditionaliste et la financiabilité. (Lourdel, 2005)⁹⁹

Lourdel met également en évidence que les programmes de cours en école d'ingénieur sont souvent orientés sur les conséquences des phénomènes climatiques et environnementaux sans s'intéresser aux causes¹⁰⁰ qui les ont précédées. La prise en compte de ces causes nécessite des réflexions sociétales et

⁹⁸ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

⁹⁹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

¹⁰⁰ Dans la littérature, on parle de stratégies *adaptatives* lorsque l'on agit en fonction des conséquences d'un problème environnemental, et de stratégies *atténuatives* lorsqu'on agit sur les causes de ce problème

systémiques qu'une forme d'imaginaire rationaliste, particulièrement marqué chez les ingénieurs, tend à endiguer. (Lourdel, 2005)¹⁰¹

La définition et la compréhension du concept même de développement durable constitue donc un enjeu majeur à son enseignement. D'une part dans la mesure où sa définition n'est toujours pas univoque et d'autre part puisqu'une certaine souplesse d'utilisation est nécessaire à l'apprentissage personnalisé du terme et à son application dans un contexte d'intégration d'enjeux multiples. Ajoutons à cela que le même type de difficultés sémantiques existent chez les professeurs, et cette constatation soutient l'importance de former les professeurs au DD et à son enseignement. L'existence d'un imaginaire rationaliste chez les ingénieurs tend à placer les barrières sémantiques au fondement de l'immobilisme ou du réductionnisme des universités en matière d'EDD. Réciproquement, l'absence de traitement de cet imaginaire (par la formation des parties prenantes ou par le décloisonnement disciplinaire) renforce les barrières sémantiques associées au développement durable.

7.2 Barrières à l'innovation

Les barrières à l'innovation sont des barrières intervenant à l'encontre des dynamiques d'innovation (c'est-à-dire d'initiatives de changement précédant d'éventuelles contraintes sur l'objet du changement). L'innovation dans le domaine du DD (et à fortiori de l'EDD) peut être de deux types (technologique et organisationnelle), et s'accompagne de barrières spécifiques à chaque type ; les barrières peuvent par ailleurs être décomposées selon l'échelle et la zone du système auquel elle s'applique (barrières individuelles et structurelles, barrières internes et externes).

Rappelons que le chapitre 5 « Quelle place pour chaque partie prenante ? » développe le rôle potentiel des chercheurs dans la recherche d'innovations pour l'EDD et pour l'intégration, au-delà de l'innovation orientée sur le DD plus largement (comme abordé par les auteurs lors de cette section).

Sur le plan typologique d'abord : Ávila et al., 2019¹⁰² proposent de les catégoriser en des innovations **technologiques** (substitution de matériaux en d'autres plus durables, innovation dans les procédés, utilisation de sources d'énergies plus propres) et des innovations **organisationnelles** (algorithmes de livraison et outils de communication efficaces, méthodes de management). L'étude détaille ensuite les barrières selon le type d'innovation à l'encontre desquelles elles agissent, et selon leur importance en fonction des zones géographiques visées (continents ou sous-continent).

Laurett et al., 2019¹⁰³ mettent en avant une décomposition en des barrières d'ordre **individuelles**, issues d'un déficit de conscience, de connaissance ou d'information d'une part, et d'autre part les pièges culturels qui obscurcissent la vision et par là endiguent l'action ; et des barrières à l'échelle **systémique** lorsqu'elles proviennent d'une résistance interne ou externe du système concerné par l'innovation. Les barrières internes au système peuvent être d'ordre structurelles, politiques, sociales

¹⁰¹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

¹⁰² Ávila, L.V., Beuron, T.A., Brandli, L.L., Damke, L.I., Pereira, R.S., Klein, L.L., 2019. Barriers to innovation and sustainability in universities: an international comparison. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 805–821. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2019-0067>

¹⁰³ Laurett, R., do Paço, A., 2019. Sustainability Barriers, in: Leal Filho, W. (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1608–1614. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_188

ou culturelles. Quant aux barrières externes, elles peuvent être issues de la gouvernance, du contexte de marché, de problèmes techniques, et du système de valeurs en contradiction.

Selon Vemury, et al., 2018¹⁰⁴, une méthode d'enseignement exclusivement mono-disciplinaire (chaque module de cours s'inscrit dans une discipline précise bien que le cursus puisse aborder plusieurs disciplines au total) peut être considérée comme une barrière à l'apprentissage du développement durable car elle ne permet pas de développer de capacité en résolution de problèmes complexes.

Le tableau 7.1 fait état des résultats apportés par ces différentes études. L'annexe 6 en détaille l'origine, l'objectif et les résultats complets.

Ávila et al., 2019¹⁰⁵	
Objectif	Identifier les barrières les plus courantes par type et par zone géographique.
Résultats	Les résultats montrent que, quelle que soit la région considérée, c'est à l'encontre des innovations organisationnelles que le plus de barrières se dressent. On peut détailler ces barrières pour celles qui s'appliquent principalement en Europe : L'absence d'un comité de pilotage ; Le manque d'engagement envers l'innovation ; Le manque de recherche et développement ; L'absence de moyens matériels ; Le manque de soutien administratif ; Le manque de connaissances et d'éducation.
Laurett et al., 2019¹⁰⁶	
Objectif	Proposer une procédure d'identification systématique des barrières par une décomposition thématique.
Résultats	Une sélection représentative des résultats de la procédure est : Barrières individuelles : Manque de conscience, de connaissances et d'information Ignorance ; Pensée linéaire ; Difficulté de visualiser le besoin de changement ; Surabondance d'informations et incapacité de les traiter ; Incapacité à écouter.

¹⁰⁴ Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>

¹⁰⁵ Ávila, L.V., Beuron, T.A., Brandli, L.L., Damke, L.I., Pereira, R.S., Klein, L.L., 2019. Barriers to innovation and sustainability in universities: an international comparison. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 805–821. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2019-0067>

¹⁰⁶ Laurett, R., do Paço, A., 2019. Sustainability Barriers, in: Leal Filho, W. (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1608–1614. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_188

	<p>Pièges culturels</p> <ul style="list-style-type: none"> Priorisation d’autres enjeux de société ; Fascination envers la technologie ; Manque d’imagination ; Résistance psychologique au changement ; Croyance en le progrès ; Mode de consommation ; Victimisation. <p>Barrières systémiques :</p> <p>Internes</p> <ul style="list-style-type: none"> Manque d’objectifs et de stratégie ; Difficulté de prise de décision et de responsabilisation ; Priorités court-termismes ; Manque de continuité et de coordination avec d’autres projets ; Manque de ressources ; Manque de conscience ou d’intérêt ; Manque de compétences ; Inconfort et incertitudes ; Scepticisme au regard des bénéfiques ; Manque d’ouverture d’esprit ; Barrière du langage. <p>Externes</p> <ul style="list-style-type: none"> Régulation extérieure du système peu claire, peu exigeante ou changeante ; Coûts financiers et en temps non assumables ; Manque d’accès à l’information ; Manque d’engagement généralisé ; Mise en examen par les parties prenantes externes.
Vemury, et al., 2018¹⁰⁷	
Objectif	Identifier les barrières s’appliquant spécifiquement aux méthodes d’enseignement.
Résultats	Le cloisonnement disciplinaire est considéré comme une barrière en ce qu’il endigue la qualité de l’apprentissage ; Dans un autre registre, la résolution systématique de problèmes dits « bien structurés » ne permettrait pas aux étudiants de se confronter à la complexité et l’urgence des problèmes auxquels ils feront face ainsi qu’à y adresser des solutions adaptées.

Tableau 7.1 : Résultats des barrières à l’innovation

¹⁰⁷ Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>

On y apprend tout d'abord que ce sont les barrières d'ordre organisationnelles qui sont les plus importantes. En Europe, ce sont le manque de pilotage, d'engagement, de R&D, de moyens matériels et de conscience qui sont prédominantes. On y apprend également que des pièges culturels existent : comme une fascination envers la technologie, une croyance envers le progrès et un conservatisme social. A l'échelle systémique, des barrières peuvent exister en interne comme pour le manque de stratégie et de coordination ou avec le cloisonnement disciplinaire ; et en externe comme pour le manque de régulation ou de moyens financiers.

Ceci permet de positionner la place des barrières dans un système complexe :

Toutes ces barrières s'articulent et s'appliquent sur une variété d'éléments et à diverses échelles spatiales, temporelles et structurelles. Cette arborescence de barrières est à l'image du système auquel il s'applique : complexe.

7.3 Barrières à l'adaptation

Les barrières à l'adaptation sont des barrières empêchant un ensemble d'acteurs de s'adapter face à un changement de conditions environnantes, considérées comme contraignantes. Le processus d'adaptation peut être décomposé en une phase de compréhension, une phase de planification, et une phase de pilotage du changement ; toutes ces phases observent l'apparition de barrières spécifiques. Cependant, des barrières culturelles s'appliquent à chacune de ces phases lorsque l'on applique le processus d'adaptation aux ingénieurs.

Moser et al., 2010¹⁰⁸ s'intéressent à dresser un cadre systématique pour identifier les barrières qui s'opposent à l'adaptation dans le cadre du dérèglement climatique. Ces barrières se décomposent aisément en de nombreuses catégories qui permettent de poser un cadre à l'identification systématique des barrières à l'adaptation. Les catégories gagnent à être définies par l'implication de sous-systèmes en interaction : les acteurs, l'objet en interaction avec les acteurs et le contexte accueillant ces interactions, comme décrit à la figure 7.4.

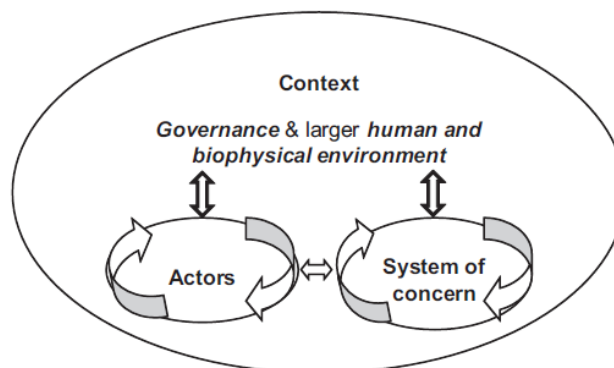


Figure 7.4 : Eléments en interaction lors du processus d'adaptation (Moser et al., 2010¹⁰⁹)

¹⁰⁸ Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. PNAS. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>

¹⁰⁹ Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. PNAS. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>

Selon les auteurs, les phases du processus d'adaptation, auxquelles s'appliquent les barrières, sont :

- La phase de compréhension (détection d'un problème, recueil d'informations, redéfinition du problème) ;
- La phase de planification (développement d'options, évaluation, comparaison, sélection d'une option) ;
- La phase de pilotage (implémentation, gestion des réponses, évaluation de l'option).

Boyle, 2004¹¹⁰ avance pour sa part que les technologies déployées par les ingénieurs ont bien souvent une dimension culturelle. Selon elle, l'absence de pensée critique, de diversité culturelle, de capacité d'innovation et de maîtrise des fondamentaux théoriques sont des critères pouvant mener à l'incapacité à répondre efficacement à un problème environnemental. Elle met également en évidence que des problèmes peuvent être liés entre eux et que, sans une vue d'ensemble et une pensée complexe, il est très difficile de les surmonter. On est alors confrontés à un problème apparent dont la résolution ne représente que peu d'enjeu et d'un problème plus fondamental plus difficile à identifier et à traiter mais dont la résolution a bien plus d'enjeu. La dimension culturelle de l'approche des ingénieurs est à l'origine des problèmes apparents, et le traitement des problèmes fondamentaux est ainsi soumis à des barrières.

Le tableau 7.2 fait état des résultats des études présentées. L'annexe 7 en détaille l'origine, l'objectif et les résultats complets (comme pour les barrières à l'innovation).

Moser et al., 2010¹¹¹	
Objectif	Processus d'identification systématique des barrières à l'adaptation.
Résultats	<p>Les barrières identifiées s'opposent à :</p> <p>La compréhension :</p> <ul style="list-style-type: none"> Existence et détection d'un signal, dépassement d'un seuil de préoccupation ; Disponibilité et pertinence d'informations sur le problème ; Réceptivité et usage de ces informations ; Inquiétude, besoin et faisabilité d'un changement. <p>La planification :</p> <ul style="list-style-type: none"> Existence d'un leadership ; Identification et consensus sur les objectifs, développement d'options ; Accès à des données et des critères/méthodes d'évaluation des options, accord sur les données, les critères, les méthodes et les options ; Préoccupation sur les effets secondaires et la faisabilité des options, degré de contrôle et de responsabilité des acteurs, sélection et légitimité d'une option.

¹¹⁰ Boyle, C., 2004. Considerations on educating engineers in sustainability. International Journal of Sustainability in Higher Education 5, 147–155. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370410526233>

¹¹¹ Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. PNAS. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>

	<p>Le pilotage :</p> <p>Seuil d'intention dépassé, autorisations, disponibilité des ressources et développement d'un plan d'action ;</p> <p>Développement d'un plan de surveillance, accès à la technologie, disponibilité et durabilité des ressources, collection et analyse de résultats ;</p> <p>Disponibilité de données, de méthodes d'évaluation et d'expertise, volonté d'apprendre et de s'adapter, évaluation de l'adaptation et de la faisabilité de sa correction.</p>
Boyle, 2004 ¹¹²	
Objectif	Focus sur les barrières culturelles à l'adaptation chez les ingénieurs.
Résultats	<p>Les problèmes dus à l'existence de problèmes apparents et face au traitement de problèmes fondamentaux chez les ingénieurs sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> Un manque de maturité et de sensibilité aux enjeux sociétaux ; Un manque de connaissances des applications du DD dans sa discipline chez les intervenants ; Un manque d'acceptation des concepts de la durabilité, principalement chez les défenseurs du <i>techno-solutionnisme</i> ; Un manque de ressources et d'ouvrages de référence ; Un manque d'exemples de projets durables ; Un manque de temps/ de disponibilité.

Tableau 7.2 : Résultats des barrières à l'adaptation

On peut retirer de ce tableau que des barrières peuvent intervenir à chaque étape élémentaire du processus d'adaptation et empêcher ainsi son aboutissement. Chez les ingénieurs, de nombreux biais culturels interviennent lorsqu'un manque de maturité, de sensibilité, de connaissances, de ressources et de temps apparaît. Cela tend à obscurcir les problèmes fondamentaux et à s'adresser à des problèmes apparents.

Pour résumer ce chapitre, concernant les barrières à l'intégration du DD dans la formation des ingénieurs, ces dernières peuvent tout d'abord être d'ordre sémantique lorsque les termes employés ne sont pas univoques : c'est principalement le cas du concept de développement durable mais l'ambiguïté se prolonge en réalité sur tout un ensemble de concepts sous-jacents à son application. Dans un deuxième temps, les barrières peuvent s'adresser à une volonté de changement : l'innovation. Dans ce cas, ce sont les pièges culturels, les barrières organisationnelles et le cloisonnement disciplinaire qui sont surtout mis en évidence. Enfin, les barrières peuvent freiner le processus d'adaptation lorsque les phases de compréhension, de planification ou de pilotage ont un défaut d'étape ou lorsque des biais culturels propres aux ingénieurs se manifestent.

Il en ressort que :

¹¹² Boyle, C., 2004. Considerations on educating engineers in sustainability. International Journal of Sustainability in Higher Education 5, 147–155. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370410526233>

L'identification des barrières repose en premier lieu sur quatre questions fondamentales : A-t-on compris le problème ? Y a-t-il des contraintes ? Si oui, doit-on s'adapter ? Si non, a-t-on un intérêt à innover ?

L'identification des barrières à l'innovation et à l'adaptation se complètent en ce qu'elles ne s'adressent pas aux mêmes contextes et aux mêmes parties prenantes. Les barrières à l'innovation se font ressentir lorsque la démarche d'intégration n'est pas encore engagée : c'est-à-dire aux éventuels *leaders* ayant pour volonté d'amorcer cette intégration. Les barrières à l'adaptation peuvent à l'inverse se dresser dans un contexte où le processus est amorcé mais lorsque des résistances freinent encore l'avancement ; ou alors lorsque le processus est opéré en réaction à un changement de conditions environnantes.

Une autre proposition d'interprétation des barrières à l'innovation et à l'adaptation peut être effectuée au travers des conceptions respectivement de durabilité socio-centrée et de durabilité forte de ces barrières. L'innovation est un processus qui met en avant la dimension sociale (ici, le changement de cursus des ingénieurs) comme contexte au sein duquel la dimension environnementale (ici, l'EDD) est traitée, et qui elle-même fait intervenir des considérations économiques (ressources humaines et financières). Il s'agit donc d'une conception socio-centrée de l'intégration car elle met en perspective les dimensions sociale, environnementale et économique dans cet ordre. L'adaptation, quant à elle, présente le contexte environnemental comme contraignant sur la dimension sociale (nécessité de s'adapter), avec la nécessité en interne de gérer/ménager la dimension économique (économie de ressources) ; ce qui se rapproche d'une conception forte de la durabilité.

Concernant les barrières individuelles, il est étonnant de ne pas voir intervenir les biais cognitifs, qui représentent potentiellement des barrières à l'intégration. Il s'agit ici d'une zone d'ombre de la littérature telle qu'elle a pu être sondée (sans recherche spécifique dessus).

8. Quels sont les leviers d'action invocables ?

Les leviers d'action sont des actions, des stratégies ou des programmes permettant de surmonter les barrières, et de manière générale de favoriser l'intégration du DD dans la formation des ingénieurs. Concernant l'inhibition des barrières, il apparaît dans un premier temps que leur identification constitue une grande partie des leviers d'action de ce type, bien que de nombreuses bonnes pratiques additionnelles résurgent de la littérature. A cela s'ajoute des pratiques permettant d'exploiter le fonctionnement naturel du système d'enseignement, autrement dit une manière d'avancer « le vent dans le dos ». Par exemple, en exploitant les dynamiques d'émergence propres aux systèmes complexes. Enfin, des conseils généraux d'organisation peuvent également représenter des leviers.

D'une part, les barrières internes peuvent être levées à l'aide d'intervenants extérieurs, comme décrit par Ávila et al., 2019¹¹³ : ils expriment l'importance centrale de faire intervenir des parties prenantes

¹¹³ Ávila, L.V., Beuron, T.A., Brandli, L.L., Damke, L.I., Pereira, R.S., Klein, L.L., 2019. Barriers to innovation and sustainability in universities: an international comparison. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 805–821. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2019-0067>

extérieures (spécialisées ou extra-disciplinaires) à l'établissement afin de surmonter les difficultés d'identification des barrières.

D'autre part, le système d'enseignement est contraint par des barrières issues de frontières entre des systèmes de connaissances et des systèmes de gouvernance. Toutes les connaissances produites dans le cadre de l'EDD nécessitent donc d'être traitées stratégiquement, surtout lors de leur transmission des chercheurs aux décideurs des programmes d'apprentissage. Cach et al., 2003¹¹⁴ décrivent pour cela le système des connaissances scientifiques et techniques comme un système complexe ayant pour finalité de produire des actions, des produits, des services durables. A cet effet, il est nécessaire, pour rendre ces connaissances effectives, de concevoir un système de connaissances efficace dans sa capacité à lier la connaissance à l'action.

Vargas et al., 2019¹¹⁵ Décrivent le processus d'intégration dans son ensemble qu'ils qualifient de « processus de *maturation*¹¹⁶ ». La maturation ne constitue, selon eux, pas une transition totale des comportements et des normes ; mais est progressif et dépend du contexte social environnant le système éducatif à transformer. Les quatre grandes étapes de la maturation sont : l'émergence, la vulgarisation, la formalisation dans un cadre de gouvernance, et la maturité reflétée dans les changements normatifs.

Pour revenir au rôle spécifique du comité de pilotage, Hill et al., 2018¹¹⁷ ont identifié un ensemble de valeurs/compétences qu'un comité de pilotage doit maîtriser afin de gérer stratégiquement une transition de l'enseignement vers l'EDD.

Plus largement, Boyle, 2004¹¹⁸ présente le rôle sociétal de l'ingénieur à venir comme basé sur le service et non plus le produit. Ceci implique que des compétences sociales, culturelles et environnementales sont requises afin de mener une véritable innovation dans le cadre du DD et de sortir des solutions traditionnelles.

Enfin, Lourdel, 2005¹¹⁹ avance aussi plusieurs pistes pédagogiques en mesure de favoriser l'enseignement intégré du développement durable.

Le tableau 8.1 répertorie les objectifs et les résultats de chacune de ces études.

¹¹⁴ Cash, D.W., Clark, W.C., Alcock, F., Dickson, N.M., Eckley, N., Guston, D.H., Jäger, J., Mitchell, R.B., 2003. Knowledge systems for sustainable development. Proceedings of the National Academy of Sciences 100, 8086–8091. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100>

¹¹⁵ Vargas, L., Mac-Lean, C., Hüge, J., 2019. The maturation process of incorporating sustainability in universities. International Journal of Sustainability in Higher Education 20, 441–451. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-01-2019-0043>

¹¹⁶ La maturation semble refléter une phase plus persistante que l'intégration, elle s'étend à la phase de régime de l'EDD.

¹¹⁷ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. International Journal of Sustainability in Higher Education 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

¹¹⁸ Boyle, C., 2004. Considerations on educating engineers in sustainability. International Journal of Sustainability in Higher Education 5, 147–155. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370410526233>

¹¹⁹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Ávila et al., 2019 ¹²⁰	
Objectif	Identification et levée des barrières.
Résultats	Importance centrale de faire intervenir des parties prenantes extérieures à l'établissement afin de surmonter les difficultés d'identification des barrières*.
Cach et al., 2003 ¹²¹	
Objectif	Concevoir un système de connaissance efficace : c'est-à-dire capable de lier la connaissance et l'action.
Résultats	<p>Une étude de cas a mené les auteurs à caractériser ce que les systèmes de connaissances considérés comme efficace font :</p> <p>Une communication active, itérative et inclusive*. A l'inverse, l'efficacité d'un système de communication est réduite lorsque la communication est unilatérale, lorsqu'elle est peu fréquente, et lorsque certaines parties prenantes se sentent exclues du dialogue ;</p> <p>Une traduction des connaissances efficace. Il faut élaborer une compréhension commune entre parties prenantes. A l'inverse, l'utilisation de jargon, de langage technique, d'expériences personnelles, et de présomptions disciplinaires entraine la traduction des connaissances ;</p> <p>La médiation des conflits**. En effet, une base de connaissances et de compréhensions commune et l'application d'une traduction efficace ne suffit cependant pas à parvenir à traiter ces conflits.</p> <p>Les trois caractéristiques constituent une nécessité pour traiter des « effets aux frontières » entre plusieurs groupes disciplinaires différents (et la sphère scientifique en contact avec la sphère politique en particulier).</p> <p>Les auteurs proposent pour gérer les effets aux frontières l'implémentation d'organisations frontières¹²². Cette dernière a comme objectifs principaux :</p> <p>L'attribution des rôles spécifiques dans la gestion de la frontière ;</p> <p>L'élaboration d'une politique claire sur leur responsabilité et leur imputabilité, et ce en précisant les termes spécifiques de part et d'autre de la frontière ;</p>

¹²⁰ Ávila, L.V., Beuron, T.A., Brandli, L.L., Damke, L.I., Pereira, R.S., Klein, L.L., 2019. Barriers to innovation and sustainability in universities: an international comparison. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 805–821. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2019-0067>

¹²¹ Cash, D.W., Clark, W.C., Alcock, F., Dickson, N.M., Eckley, N., Guston, D.H., Jäger, J., Mitchell, R.B., 2003. Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100, 8086–8091. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100>

¹²² Ces organisations et objets frontières ne sont pas sans rappeler la notion de comité de pilotage.

	La production de forums au sein desquels chaque partie prenante peut produire/apporter des connaissances à rendre communes, et ce à l'aide d'« objets frontières » (la plupart du temps des outils informatiques). Ces objets doivent être suffisamment adaptables à différents points de vue et suffisamment robustes pour maintenir leur identité.
Vargas et al., 2019¹²³	
Objectif	Identifier les leviers permettant à l'intégration d'émerger et de maturer.
Résultats	<p>Suite à cette étude de cas, les auteurs ont pu identifier les résultats principaux :</p> <p>La nécessité d'avoir des leaders** qui jouent le rôle de précurseur et de moteur dans la transition et ont les clés pour aller à l'encontre de l'inertie de l'organisation. Il peut s'agir d'étudiants, de professeurs ou de chercheurs ;</p> <p>L'émergence de nouveaux acteurs, de nouvelles organisations et de nouvelles commissions, ainsi que le réseautage qui accompagne cette émergence ;</p> <p>La coordination et la collaboration* entre les acteurs ainsi que le court-circuitage des cloisonnements disciplinaires et départementaux ;</p> <p>Le soutien de la part des autorités, l'attribution de fonds et la quantité suffisante de personnel disponible sont également des leviers d'action importants.</p>
Hill et al., 2018¹²⁴	
Objectif	Mise en évidence des soft skills les plus importantes à avoir pour le comité de pilotage.
Résultats	<p>Il s'agit de :</p> <p>La patience et la résilience * **, car la transition se déroule souvent sur plusieurs années avec de nombreux obstacles et imprévus ;</p> <p>L'engagement et la passion**, car il s'agit d'un moteur essentiel à la transition ;</p> <p>Ils doivent être stratégiques et conscients du processus de transition, car la gestion de toutes les parties prenantes est autant une barrière qu'un levier selon comment on la mène ;</p> <p>La communication et la transparence*, car les préoccupations des étudiants et des professeurs sont diverses et nécessitent d'être prises en considération ;</p> <p>La collaboration et l'ouverture à la critique**, car cela amène plus d'engagement de la part de chaque partie prenante et permet de tenir compte des faiblesses du comité de pilotage ;</p> <p>La souplesse**, car plusieurs solutions existent et la décision de la solution doit correspondre à toutes les parties prenantes.</p>

¹²³ Vargas, L., Mac-Lean, C., Hüge, J., 2019. The maturation process of incorporating sustainability in universities. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 441–451. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-01-2019-0043>

¹²⁴ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

Boyle, 2004 ¹²⁵	
Objectif	Transformation du rôle sociétal de l'ingénieur au travers de cours d'ouverture.
Résultats	Elle propose, entre autres, des programmes de cours sur les sujets suivants : Les fondements de la durabilité (introduction aux composantes culturelles, éthiques, philosophiques, économiques et juridiques de la durabilité) ; Les procédés et technologies durables ; L'analyse de risque appliquée à la durabilité ; La conception durable ; Le leadership durable.
Lourdel, 2005 ¹²⁶	
Objectif	Conseils pédagogiques.
Résultats	L'autrice conseille : Des expériences personnelles/ apprentissage expérimental ; L'apprentissage sur les phénomènes naturels et humains ; L'accompagnement à la prise de conscience, à l'aptitude à apprendre et à débattre ; La responsabilisation et autonomisation des étudiants ; Stimulation de la créativité, activités heuristiques ; Le développement de la personnalité et apprentissage de la médiation entre personnalités différentes ; La conciliation des préoccupations sociales, culturelles et économiques du DD sans rester sur une approche réductionniste* ; La formation des enseignants au DD et à la pédagogie associée*.
* : Leviers d'action par la levée des barrières	
** : Leviers du type « soft skills »	

Tableau 8.1 : Résultats des leviers d'action

On peut constater, à la vue des principaux résultats issus de la littérature, que les leviers d'actions - plus encore que les barrières - sont régulièrement d'ordre organisationnels : communication, médiation des conflits, coordination, transparence, souplesse, etc. Ce type de leviers apparaissent plus largement comme des soft skills permettant de fluidifier la dynamique d'intégration à tous les niveaux du système d'enseignement, mais particulièrement pour le système de pilotage : le comité correspondant se doit de présenter une maîtrise approfondie de ces soft skills. Entre autres, le comité de pilotage peut représenter une organisation frontière entre le système de connaissances et le système de gouvernance,

¹²⁵ Boyle, C., 2004. Considerations on educating engineers in sustainability. International Journal of Sustainability in Higher Education 5, 147–155. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370410526233>

¹²⁶ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

tous deux sous-ensembles du système d'enseignement, et dont l'objet est de gérer le découplage existant entre les deux. Découplage devant être traité avec autant de souplesse (pour la fluidité de la dynamique d'intégration) que de rigidité (pour la transmission et la mise en application effective des connaissances). Autrement dit, le comité de pilotage a une fonction organisationnelle dans la transmission didactique des savoirs sur l'EDD et sur l'intégration jusqu'au système de gouvernance. Enfin, concernant les conflits pédagogiques, les résultats montrent que l'apprentissage social et expérimental, le développement de la sensibilité et l'apprentissage de la médiation des conflits sont les principales activités permettant d'apprendre sur le plan pédagogique.

C'est également en créant du lien durable (et donc, en levant des barrières) entre les différentes parties prenantes et entre les différents niveaux d'organisation que le système d'enseignement développera la complexité suffisante pour répondre à l'enjeu complexe que représente l'intégration du DD dans la formation des ingénieurs de manière adéquate. Il apparaît cependant que la création de complexité n'est – à elle seule – pas suffisante à cet exercice, c'est pourquoi les leviers d'actions se composent également de « bonnes pratiques » sur les plans didactiques et pédagogiques permettant de guider l'effort de pilotage. Enfin, il apparaît que des dynamiques propres aux systèmes complexes (leadership, émergence, effet d'entraînement, etc.) existent indépendamment des actions menées pour l'intégration et que ces dynamiques gagnent à être exploitées au bénéfice de l'intégration.

Les dernières nécessités **qualitatives** peuvent être formulées comme :

L'intégration requiert de maîtriser les effets aux frontières, les dynamiques émergentes et les bonnes pratiques. Ces nécessités sont spécifiquement d'ordre qualitatives, et n'ont de sens que dès lors que les nécessités quantitatives (création de complexité sociale) sont assurées.

Conclusion sur la revue de littérature

Au cours de la revue de littérature, il a pu être identifié qu'un changement de paradigme pour le métier de l'ingénieur s'avère nécessaire, tant au regard des nouveaux attendus sociaux envers la profession qu'a fortiori au regard des ceux des entreprises. Entre autres, le cloisonnement disciplinaire et l'approche analytique, encore forts imprégnés dans le paradigme de l'ingénieur, reposent sur des fondements positivistes et réductionnistes des sciences. Positionnement ne permettant pas de prendre en compte la complexité du système terre et du type de problèmes reliés – dits pernicieux - auxquels les ingénieurs sont naturellement confrontés. Les sciences de manière générale ont cependant évolué au cours du XXe siècle pour adopter des paradigmes constructivistes, comme pour les sciences de la complexité. Leur objet principal, le système complexe, a été choisi comme outil conceptuel pour traiter la question de l'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs. Intégration permettant de répondre au besoin de changement de paradigme.

L'utilisation des systèmes complexes apparaît à ce stade comme un moyen de transformer le paradigme de l'ingénieur par l'éducation, et donc à leur enseigner la complexité. Mais il a également pu être identifié que le système d'éducation est lui-même un système complexe, et que l'intégration d'enjeux complexes dans un système complexe est aussi un enjeu complexe. Il est ainsi apparu comme nécessaire de traiter la question de l'intégration comme une dynamique, non pas à résoudre, mais à piloter ; et que cette dynamique requiert en amont de créer de la complexité sociale. Il a également pu être observé que des conflits instrumentaux apparaissent au sein du système d'enseignement : entre des artefacts didactiques (contenu et manière de le représenter), pédagogiques (moyen de transmettre,

partager, générer du savoir) et techniques (outils permettant la relation entre le sujet apprenant et l'objet d'apprentissage). Ces conflits ont une manifestation homéostatique pour l'intégration.

Si le système d'enseignement est un système complexe, il se compose d'une grande quantité d'éléments en interaction. En bonne approximation, ces éléments peuvent se rapporter à la communauté qui le compose, et être décomposés en les catégories de parties prenantes : *program's directors*, professeurs, chercheurs, étudiants, comité de pilotage, et intervenants externes. Chacune de ces parties peut voir son rôle actuel au sein du système d'enseignement au regard de son rôle potentiel pour l'EDD et pour l'intégration, et des pistes d'amélioration leur permettent d'accéder à ce rôle potentiel.

Le processus d'intégration, dans sa dimension stratégique, s'adresse aux mécanismes d'homéostasie du système d'enseignement. Le besoin d'un changement de paradigme des sciences de l'ingénieur, confronté à ces mécanismes, indique alors un changement en profondeur dans le cursus de l'étudiant ingénieur. Ce type de changement ayant déjà été mené au cours d'études expérimentales, leurs résultats ont pu mettre en avant l'existence des conflits instrumentaux et de la nécessité de renforcer la conception des artefacts en conséquence. Sur le plan pédagogique : au travers de méthodes pédagogiques adaptées à l'EDD (dites connectivistes) ; et sur le plan didactique : au travers de retours d'expérience d'EDD et d'intégration ainsi qu'au travers d'outils destinés à la formation des professeurs.

Plus largement, et en sortant du cadre spécifique de l'EDD et de l'intégration, il a pu être identifié que des barrières s'opposent à toutes les activités liées au DD. Ces barrières peuvent être d'ordre sémantiques lorsque de l'incompréhension culturelle, de la polysémie et des conflits d'intérêts interviennent dans la définition, et de la traduction du développement durable. Elles peuvent aussi s'adresser au processus d'innovation lorsque l'intégration n'est pas encore amorcée ou au processus d'adaptation en cours d'intégration : elles sont alors principalement organisationnelles, culturelles ou liées à la sensibilité individuelle. Ces barrières peuvent cependant être levées au travers de leviers d'action, qui offrent par ailleurs des lignes directrices à l'intégration au travers de « bonnes pratiques ».

Finalement, on peut résumer les nécessités stratégiques du système d'enseignement pour l'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs en deux points :

- (1) La validation des nécessités quantitatives : la constitution d'un système de pilotage, la mise en relation des parties prenantes entre elles et en particulier avec des intervenants extérieurs, et le décloisonnement disciplinaire ;
- (2) La validation des nécessités qualitatives : le guidage de ce système de pilotage, de son flux de représentation, la prise en compte des effets aux frontières, la conception des artefacts pédagogiques, didactiques et techniques, et la prise en compte des barrières et des leviers d'action.

Pour finir, la figure C.1 montre le détail des apports des systèmes complexes à l'intégration, résultants de la littérature scientifique, et pris dans le cadre contextuel décrit au chapitre 1 « Contexte » (à l'image de la figure 1.4). On peut y observer que les enjeux de DD sont complexes de par leur nature interdisciplinaire et holistique, que le système d'enseignement est un système complexe et donc qu'il présente naturellement des barrières, que la nature complexe de ce système lui confère cependant des propriétés telles que l'émergence, qu'une approche systémique permet d'identifier le système

Partie C : Application des résultats de la revue de littérature

La revue de littérature a permis d'identifier un ensemble de nécessités à prendre en compte lors du pilotage de l'intégration des enjeux de développement durable dans la formation des ingénieurs. En l'état, ces nécessités ne constituent cependant pas un plan d'action opérationnel pour l'intégration. Par ailleurs, des initiatives de terrain pour guider l'intégration ont émergé au sein de la communauté thématique de l'éducation au développement durable. Ces initiatives ont, pour certaines, débouché sur l'élaboration d'un outil opérationnel d'intégration. Ces deux constatations se rejoignent en ce qu'une confrontation entre les nécessités relevées au sein de la littérature et le plan détaillé au sein des outils d'intégration de terrain est possible.

Dans cette partie, une proposition de confrontation est avancée, au travers de **l'application des résultats de la revue en une analyse des outils d'intégration**. Concrètement, cette analyse consiste à **développer une grille de critères « à prendre en compte » selon les résultats de la revue** (Chapitre 9 « Conception de la grille d'analyse »). Cette grille permettra donc d'évaluer l'étendue des critères remplis par un outil d'intégration, ainsi que leur degré de prise en compte dans un plan d'action. Pour illustrer le propos, la grille sera appliquée à un outil d'intégration en particulier (Chapitre 10 « Evaluation de l'outil proposé par The Shift Projet – INSA »). *A fortiori*, la grille peut être appliquée à n'importe quel autre outil d'intégration, et une version vierge de la grille est disponible à l'annexe 8 à cet effet.

9. Conception de la grille d'analyse

Le développement de la grille d'analyse passe par trois étapes de conception : le choix des critères, le choix de la pondération, et le choix de la sommation des notes.

Concernant les critères, ces derniers ont été choisis en répertoriant sur une carte mentale tous les résultats de la revue de littérature. Les résultats ont alors pu être classifiés au regard des catégories apparentes dans la revue : titres et sous-titres de chapitre, catégorie de résultats selon un article, nécessités croisées entre deux chapitres différents, etc. Le degré de précision d'une catégorie s'est adapté à la diversité de résultats présents. Par exemple, il y a une grande diversité de résultats sur le plan homéostatique (barrières à l'intégration), avec la décomposition en barrières techniques et organisationnelles, individuelles et systémiques, culturelles et éthiques, etc. Ce qui est moins le cas du plan « systèmes complexes », où les résultats servent autant à poser les bases de la suite de la revue qu'à présenter des résultats sur l'intégration. La figure 9.1 présente la carte mentale résultant de cet exercice. On y retrouve (écrit en plus petit à la périphérie de la carte) les nécessités identifiées dans la revue, (en plus grand) les 29 catégories de résultats utilisées pour définir les critères de la grille, et (en gras au centre de la carte) les 6 catégories globalisant et structurant les critères.

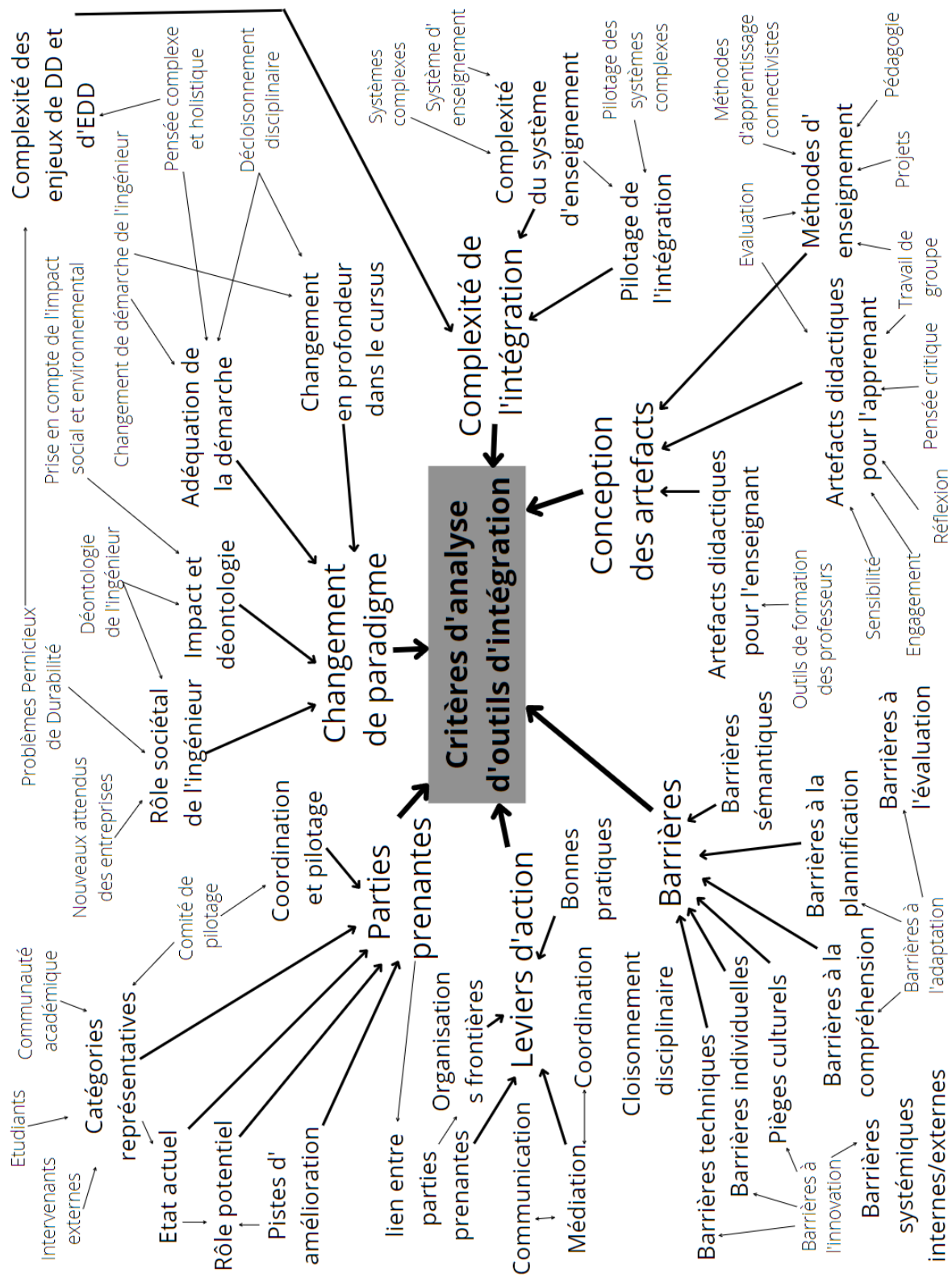


Figure 9.1 : Elaboration des critères de la grille d'analyse

Le choix de la pondération pour chaque critère revient à exprimer sa « prise en compte », c'est-à-dire la proportion dans laquelle ce critère est affiché comme important et intégré dans une réflexion d'ensemble, tant sur le fond que dans la forme. Sur le fond, de la place et du développement lui est consacré en termes de nombre de pages et de mise en avant comme d'un enjeu déterminant ; dans la forme, le critère est traité fréquemment et est mis en évidence dans le texte (couleur, gras, police, encadré, etc.). Ces dimensions ont mené à développer un gradient de pondération de 0 à 5/5 :

0 - Pas abordé : L'outil n'aborde pas ce critère.

1 - Abordé : L'outil aborde ce critère, il le cite au cours d'un paragraphe, il avance son importance ou il le prend à titre d'exemple. Le critère n'apparaît cependant pas comme une nécessité, il n'est pas mis en évidence, il n'est pas récurrent.

2 - Proposition unique : L'outil aborde ce critère, il met en évidence la nécessité de le traiter et propose pour cela une solution/ une piste de traitement. Cette piste reste cependant isolée et aucune source ne permet d'approfondir la question.

3 - Plusieurs propositions : L'outil aborde ce critère à plusieurs reprises lorsqu'il intervient dans la nécessité de mener plusieurs tâches, ou lorsque plusieurs solutions/pistes sont proposées pour y remédier. Le critère est mis en évidence de manière spécifique (code couleur, encadré spécial, symbole, etc.). Aucune source ou perspective d'approfondissement n'est cependant présente.

4 - Propositions fondées : L'outil avance plusieurs propositions de traitement de ce critère. Les propositions sont sourcées, basées sur des retours d'expériences, sur une étude dédiée, sur un ouvrage externe ou sur la littérature scientifique. Les propositions se distinguent entre elles par des indications contextuelles, et du reste par une mise en évidence spécifique. Ces propositions restent cependant isolées des autres étapes du plan d'intégration.

5 - Propositions intégrées : L'outil développe plusieurs propositions pour traiter ce critère, qu'il intègre dans un plan d'action opérationnel. Le plan d'action est mis en forme, intelligible et didactique. Le critère est pris en compte dans le plan d'action à plusieurs reprises ou au travers de plusieurs propositions pour une opération spécifique. Un plan de suivi, de deadlines, de flux de représentation, de bilans intermédiaires, etc. permet de maintenir la prise en compte du critère.

Concernant la sommation, les critères ont été compilés en 6 catégories plus larges. Chacune de ces six catégories a vu son score rapporté à une note /20, de sorte à ne privilégier aucune des dimensions résultantes des résultats. La sommation des six catégories, notées chacune /20 donne une note totale /120.

10. Evaluation de l'outil proposé par The Shift Projet – INSA

L'outil choisi pour être comparé aux résultats de la revue de littérature au travers de la grille d'analyse conçue est le rapport « ClimatSup INSA : Former l'ingénieur au XXI^e siècle » de The Shift Project, en collaboration avec le groupe INSA (<https://theshiftproject.org/article/publication-rapport-former-ingenieur-du-21esiecle/>). Ce rapport se décompose en trois volets : le manifeste, le guide méthodologique, et le recueil de retours d'expériences (rapportés respectivement au Manifeste, au Guide et aux Retours, par souci de lisibilité). Le Manifeste présente un argumentaire pour l'intégration, ainsi qu'un référentiel de connaissances et de compétences à implémenter, il s'adresse principalement aux professeurs, aux décideurs et aux ingénieurs pédagogiques. Le Guide présente une

méthode pour engager l'évolution des formations d'ingénieurs, il est principalement destiné aux directeurs d'établissements, de formation, ou de département. Les Retours, quant à eux, présente la méthodologie et les résultats de l'étude ayant mené à produire les deux autres volets, il s'adresse à toute partie prenante.

La grille d'évaluation, directement appliquée à l'analyse de l'outil choisi, est présentée au tableau 10.1.

Catégories	Note	Commentaire	Total
Changement de paradigme			18/20
Rôle sociétal de l'Ingénieur	5	Argumenté, sourcé et suivi dans le Manifeste.	
Impacts et déontologie	4	Argumenté et sourcé dans le Manifeste.	
Adéquation de la démarche à la complexité	4	Approche systémique et complexe décrite et sourcée dans le Manifeste.	
Changement en profondeur du cursus	5	Mise en perspective des Ingénieurs d'aujourd'hui et de demain, du changement de paradigme et de cursus dans le Manifeste.	
Complexité de l'intégration			10/15
			13,3/20
Complexité du DD et de l'EDD	4	Complexité des enjeux socio-environnementaux dans le Manifeste.	
Complexité du système d'enseignement	1	Notion d'écosystème d'un établissement dans le Guide, pas plus de détails.	
Pilotage de l'intégration	5	Complexité de l'intégration mise en avant par les phases 0) « Engager les premières actions » et 1) « Définir une stratégie d'établissement à la hauteur des enjeux » du Guide. Proposition d'un comité de pilotage resserré et élargi ainsi que les constantes de temps des tâches à réaliser.	
Parties Prenantes			14/20
Catégories représentatives	3	Parties prenantes internes et externes synthétiques et représentatives dans le Guide.	
Rôle potentiel	5	Description détaillée du rôle potentiel à chaque phase de l'intégration dans le Guide. Rôle des chercheurs décrit dans les Retours, chapitre 2.2) « Transformer les enseignements implique de repenser la stratégie	

		générale de l'établissement ».	
Pistes d'amélioration	1	Abordé en parallèle du rôle potentiel mais aucune description des compétences à développer chez chaque partie prenante dans le Guide.	
Coordination et pilotage	5	Catégorie de partie prenante « Comité de Pilotage » au rôle spécifique et central dans le Guide. La coordination prend en compte la dimension temporelle.	
Conception des Artefacts			7/15 9,3/20
Méthodes d'enseignement	2	Equipe de formation pédagogique constituée et processus de validation et de mise en place des objectifs pédagogiques dans le Guide. Peu de remise en question de l'enseignement transmissif cependant.	
Outils didactiques pour l'apprenant	4	Propositions d'activités diverses et plus interdisciplinaires dans le Guide. Prise en compte de la dimension temporelle. Peu de flux de représentation cependant (évaluations).	
Outils didactiques pour l'enseignant	1	Abordé dans le Chapitre 3.3) « Former les principales parties prenantes » des Retours, assez tardivement et de manière peu détaillée. La formation du corps enseignant est présentée comme un souhait et comme une phase accessoire.	
Barrières à l'intégration			20/50 8/20
B. sémantiques	4	Polysémie des termes de DD, Transition, Responsabilité et Systémique, abordée dans le Chapitre 2.1) « Pourquoi parler d'enjeux de la transition « socio-écologique » ? » des Retours.	
B. techniques	4	Abordé dans la phase 2) « Organiser la mobilisation » du Guide, avec la mise à disposition de moyens humains et techniques. Renvoi vers des ouvrages de référence détaillant davantage les outils techniques abordés dans le Guide. Approfondi dans les Retours, au chapitre 5) « Méthode et mise en œuvre dans les établissements du groupe INSA ».	
B. individuelles	0	Pas abordé.	
Pièges Culturels	1	Abordé dans le Manifeste, section 2.2) « Analyser les	

		réécits dominants et alternatifs ».	
B. systémiques internes	3	Décrites « en vrac » au Chapitre 5) « Méthode et mise en œuvre dans les établissements du groupe INSA » des Retours.	
B. systémiques externes	3	Abordé dans le chapitre 1.2) « Les institutions entendent le message, mais peinent à le traduire en action » des Retours et approfondis dans le Chapitre 6) « D'autres acteurs se mobilisent ».	
Cloisonnement disciplinaire	1	Abordé dans le Manifeste.	
B. à la compréhension	1	Abordé dans la description de la procédure d'état des lieux dans le chapitre 3.4) « Etat des lieux des maquettes existantes ».	
B. à la planification	3	Plusieurs outils à la planification dans les Retours (référentiels, état des lieux, formations, etc.).	
B. à l'évaluation	0	Pas abordé.	
Leviers d'action			17/25
			13,6/20
Création de lien entre parties prenantes	5	Liens avec organismes externes décrit tout au long des Retours, mais principalement dans le Chapitre 6) « D'autres acteurs se mobilisent ». Lien entre parties prenantes décrites tout au long du Guide.	
Communication/ coordination/ médiation	3	Décrits « en vrac » au Chapitre 5) « Méthode et mise en œuvre dans les établissements du groupe INSA » des Retours.	
Organisations aux frontières	3	Position du comité de pilotage dans le Guide, description des effets aux frontières et de leur médiation tout au long des Retours.	
Gestion des conflits instrumentaux	1	Abordé lors du Chapitre 5) « Méthode et mise en œuvre dans les établissements du groupe INSA » des Retours.	
Bonnes pratiques	5	Tout au long des Retours.	
TOTAL			76,2/120
			12,7/20

Tableau 10.1 : Grille d'analyse pour outils d'intégration de terrain

Il apparaît sur ce tableau que la catégorie de critères que l'outil analysé remplit le mieux est de loin le changement dans le cursus de l'ingénieur, c'est-à-dire qu'il répond efficacement à la question du « Pourquoi ? ». Ceci peut s'expliquer par la volonté de faire prendre conscience des enjeux et de leur importance. L'analyse met également en avant que l'outil répond aux critères de prise en compte de la complexité, des parties prenantes, et des leviers d'action à l'intégration. Probablement que les rédacteurs de l'outil ont pu constater la complexité de la tâche d'intégration. Cependant, la conception des artefacts pédagogiques et didactiques pour l'EDD apparaît comme insuffisante. Ceci peut s'expliquer par une volonté de laisser de la liberté aux universités dans leur processus d'intégration. L'identification et la prise en compte des barrières apparaît également comme insuffisantes. Peut-être cette prise en compte a-t-elle été appliquée au plan d'intégration en amont, mais les barrières n'y apparaissent pas clairement. Les résultats montrent également que les trois volets de l'outil sont équitablement représentés, leur pertinence et leur contribution à l'intégration est donc effective. D'autant plus que la prise en compte d'un des trois volets, sans les deux autres, mènerait probablement à un score insuffisant. Ces volets apparaissent par ailleurs dans le même ordre de leur lecture indiquée (Manifeste, Guide, Retours) et dans les catégories de la grille d'analyse. Cela met en évidence un ordonnancement « Pourquoi ? Quoi ? Comment ? » similaire à celui suivi au cours de la revue. Globalement, l'analyse a mené à donner une note de 12,7/20 à l'outil. Il ne prend donc pas en compte toutes les dimensions mises en avant au cours de la revue de littérature, mais en traite néanmoins une majorité. Les dimensions identifiées comme moins prises en compte peuvent donc faire l'objet d'un point d'attention ou d'un développement complémentaire.

Conclusion sur l'application des résultats

Pour conclure sur l'application des résultats, une opportunité de comparer les résultats de la revue de littérature et des outils d'intégration (développés lors d'initiatives de terrain) est apparue, et s'est concrétisée en la conception d'une grille d'analyse de ces outils. La conception de cette grille a consisté à décomposer les résultats en des critères « à prendre en compte », et à pondérer cette prise en considération au travers de la tendance de l'outil à lui donner un traitement central au sein d'un plan d'action et de suivi. La grille a pu être appliquée à un outil de terrain choisi à titre d'exemple : le rapport « ClimatSup INSA – Former l'ingénieur au XXI^e siècle » de The Shift Project et du groupe INSA. Il a pu être mis en évidence que cet outil prend en compte une majorité de critères, et surtout ceux liés au « pourquoi ? », mais présente une carence dans sa prise en considération des barrières et des conflits instrumentaux. Cette analyse peut *a fortiori* être appliquée à n'importe quel outil d'intégration, à les comparer entre eux pour éclairer son choix, et à prendre en compte les forces et les faiblesses de l'outil choisi lors de sa mise en œuvre.

Conclusions générales et perspectives

Dans ce travail, une revue de littérature et une mise en application des résultats (en une grille d'analyse des outils de terrain) ont été menés sur la question de l'intégration du développement durable dans la formation des ingénieurs. Après une phase d'exploration du domaine et de nombreuses observations sur la richesse des angles d'approches ; il a été décidé - d'une part - de réaliser une revue de littérature et de préciser la question afin d'approfondir la recherche ; et d'autre part, de porter le travail sur l'angle d'approche que constitue les systèmes complexes, car il a pu être mis en évidence que la question de l'intégration était liée au phénomène de complexité.

Pour mener cette recherche, des outils méthodologiques ont été mis à profit : la méthode ESQ, l'approche PRISMA et l'approche PQC3. ESQ a permis d'explorer le domaine de recherche, d'en dresser un état de l'art au travers des mots-clés récurrents, de leur fréquence et de leur catégorisation thématique ; pour mener à la reformulation de la question de recherche. PRISMA a permis de sélectionner les articles à intégrer dans la revue de littérature au travers de phases d'exclusions puis de ré-inclusion. Une phase de ré-exclusion a cependant été rajoutée de sorte à prendre en compte le phénomène de saturation théorique. Enfin, PQC3 a permis de structurer la question de recherche en sous-questions, puis de les utiliser en tant que titres des six chapitres composant la revue de littérature. Notons que pour des raisons pratiques, les outils méthodologiques n'ont pas été appliqués au pied de la lettre mais ont été adaptés au contexte.

Nous avons, au cours de la recherche, pu constater que les systèmes complexes introduisent, formalisent et prennent en compte de nombreux concepts périphériques récurrents sur le DD ou sur les ingénieurs du XXI^e siècle. Plus encore, il a pu être montré que des enjeux complexes (ex. les problèmes pernicious de durabilité) doivent être intégrés au sein d'un système complexe (système d'enseignement), et que cette intégration constitue une création de complexité. C'est pourquoi les systèmes complexes constituent un outil intéressant pour aborder l'intégration. Entre autres, les systèmes complexes permettent d'aborder en quoi le système d'enseignement peine à intégrer le DD au sein des formations d'ingénieurs (barrières, inadéquation de la démarche analytique) et comment exploiter ses caractéristiques pour favoriser cette intégration (leviers d'action). D'autre part, de nombreuses bonnes pratiques (pédagogiques, didactiques, organisationnelles) ont pu être répertoriées dans la littérature scientifique. Les nécessités pour l'intégration se composent donc d'une dimension quantitative (création de complexité sociale, liens entre parties prenantes, décloisonnement disciplinaire) et d'une dimension qualitative (approche systémique, identification des barrières, leviers, bonnes pratiques, émergence).

Les résultats présentés au cours de la revue de littérature sont donc à prendre pour des nécessités stratégiques, des points « à ne pas oublier ». Ils ne constituent en revanche pas une description méthodique, procédurale et opérationnelle de la phase d'intégration, autrement dit ils ne sont pas appliqués en un outil opérationnel. Ils ne peuvent donc pas servir à guider une intégration, mais bien à analyser un plan d'intégration qui s'y applique. C'est d'ailleurs de cette manière que les résultats ont été mobilisés, au travers de la conception d'une grille d'analyse.

Les résultats de la revue de littérature peuvent donc être confrontés à leur prise en compte au sein d'outils d'intégration de terrain. Concrètement, une grille d'analyse a été développée au travers de la synthèse des résultats de la revue en différents critères, regroupés dans des catégories, elles-mêmes inspirées des résultats de la revue. A cet effet, et à titre d'exemple, le rapport « Former l'ingénieur au

XXIe siècle » de The Shift Project - INSA a été analysé au travers de cette grille. Cette analyse a pu montrer que l'outil a obtenu un score total de 12,7/20 dans son respect des nécessités mises en avant par la littérature. On peut donc considérer qu'il prend en compte de plus d'un critère sur deux. Cette grille d'analyse est rendue disponible au lecteur intéressé, et peut servir à guider le choix d'un outil d'intégration et à la prise en compte des manquements de l'outil retenu lors de son application. Elle s'adresse principalement aux directions d'établissements et aux éventuels comités de pilotage en construction.

La réalisation d'une revue de littérature et d'une application des résultats ont représenté un effort sur différents plans. Entre autres : le caractère inédit de ce type d'exercice au long du cursus, la rigueur liée à la méthodologie et le fait qu'elle s'avère très chronophage, la nécessité de contextualiser tous les résultats faisant intervenir des termes jargonneux, la nécessité de devoir croiser les résultats entre diverses études, les difficultés liées à la traduction de l'anglais, et l'exercice de synthèse pour ne citer qu'eux. Sur le plan organisationnel, plusieurs opérations/phases ont été menées en parallèle et en tenant compte du délai estimé de chacune d'elle avant leur réalisation. Plusieurs phases ont de ce fait dû être abrégées ou simplifiées, comme les deux dernières phases de la méthode ESQ. Enfin, le caractère itératif des productions/corrections a été marqué, et a nécessité de concilier les agendas entre eux. Malgré ces difficultés, la revue de la littérature et l'application des résultats ont pu être menées à leur terme. Les résultats ont permis de répondre aux questions de recherche, bien que ces mêmes questions aient évolué au cours du TFE. Les résultats ont également pu être appliqués en un outil d'analyse, qui constitue une concrétisation du travail, et qui peut être utilisé à des fins utiles.

Au cours de la recherche et de la rédaction, d'autres questions ont cependant pu émerger. Entre autres : plusieurs zones d'ombres ont été identifiées par la revue de littérature, la découverte d'un domaine entraîne naturellement des questionnements, et la construction de concepts périphériques et leur application sur la question de recherche laissent entrevoir de possibles approfondissements. Ces questions, découvertes, approfondissements et autres constructions peuvent déboucher sur des perspectives de recherche. Ces perspectives s'adressent principalement aux chercheurs désireux d'approfondir ce travail.

Parmi les perspectives imaginées, on retrouve entre autres l'identification de biais cognitifs (zone d'ombre) liés au développement durable et à son enseignement. Ce type de biais n'a pas pu être mis en évidence dans la revue de littérature effectuée. L'existence de biais cognitifs spécifiques aux thématiques socio-environnementales a pourtant pu être relevée au cours de la découverte des éléments d'inspiration. Une autre perspective, plus technique, serait d'appliquer l'approche systémique de Donnalieu et Karsky au système d'enseignement, et de déboucher sur une modélisation de ce système et des dynamiques d'homéostasie qui s'y appliquent. Cette option constitue donc un approfondissement des résultats obtenus, et permettrait de développer de meilleures compréhensions de ces dynamiques ainsi que des possibilités de prospective ; permettant un éventuel soutien technique à un système de pilotage à l'intégration. Une perspective similaire pourrait se baser sur une étude expérimentale au travers, par exemple, de sondages, d'études socio- ou psychologiques, d'application d'outils pédagogiques (comme ceux de Lourdel) ou encore d'application d'outils de formation pour toutes les parties prenantes. Une autre perspective consisterait à effectuer une recherche opérationnelle sur l'application d'un outil d'intégration de terrain au système d'enseignement. Cette option permettrait donc d'enrichir les retours d'expérience disponibles en tenant compte en amont des résultats du TFE. Cela permettrait également de valoriser la grille d'analyse développée en évaluant le degré de prise en compte des nécessités stratégiques en cours d'intégration, et de prendre en compte les « forces et les faiblesses » de l'outil à disposition (et éventuellement de les compenser). Enfin, une dernière perspective consisterait en une étude interdisciplinaire sur l'EDD et la constitution d'un

programme de formation (pour toutes parties prenantes) sur les disciplines intervenant dans l'EDD et dans l'intégration. Quoiqu'il en soit, ce travail aura permis de soulever d'autant plus de questions que celles auxquelles il aura permis de répondre.

Pour finir, s'il devait y avoir une recommandation générale résultante de ce travail, ce serait de ne pas négliger la dimension complexe des enjeux de DD, et par conséquent les répercussions en termes d'inefficacité d'une approche analytique. Autrement dit, il est conseillé de ne pas aller « trop vite en besogne », de ne pas brûler les étapes d'identification et de compréhension du problème. La précipitation systématique vers l'action, la solution (surtout pour le *techno-solutionnisme*), est symptomatique d'un paradigme inefficace au traitement des problèmes de durabilité. Avant de se demander « comment agir ? », il est nécessaire d'être à l'aise avec la question « quel est le problème ? ». Cependant, ceci ne doit pas servir de prétexte à l'inaction, les phases de compréhension et d'action peuvent tout à fait être concomitantes, et même se renforcer l'une-l'autre.

Bibliographie

- Ávila, L.V., Beuron, T.A., Brandli, L.L., Damke, L.I., Pereira, R.S., Klein, L.L., 2019. Barriers to innovation and sustainability in universities: an international comparison. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 805–821. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2019-0067>
- Boyle, C., 2004. Considerations on educating engineers in sustainability. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 5, 147–155. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370410526233>
- Byrne, E.P., Desha, C.J., Fitzpatrick, J.J., Hargroves, K. “Charlie,” 2013. Exploring sustainability themes in engineering accreditation and curricula. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 14, 384–403. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-01-2012-0003>
- Cash, D.W., Clark, W.C., Alcock, F., Dickson, N.M., Eckley, N., Guston, D.H., Jäger, J., Mitchell, R.B., 2003. Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100, 8086–8091. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100>
- Clark, W.C., Kerkhoff, L. van, Lebel, L., Gallopin, G.C., n.d. Crafting usable knowledge for sustainable development. *PNAS*. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1601266113>
- Garbolino, E., Chéry, J.-P., Guarnieri, F., 2019. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools, in: Guarnieri, F., Garbolino, E. (Eds.), *Safety Dynamics: Evaluating Risk in Complex Industrial Systems*, *Livres Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96259-7_1
- Guerra, A., 2017. Integration of sustainability in engineering education: Why is PBL an answer? *International Journal of Sustainability in Higher Education* 18, 436–454. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2016-0022>
- Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>
- Laurett, R., do Paço, A., 2019. Sustainability Barriers, in: Leal Filho, W. (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1608–1614. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_188
- Leifler, O., Dahlin, J.-E., 2020. Curriculum integration of sustainability in engineering education – a national study of programme director perspectives. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 21, 877–894. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-09-2019-0286>
- Linow, S., 2019. Integrating Climate Change Competencies into Mechanical Engineering Education, in: Leal Filho, W., Hemstock, S.L. (Eds.), *Climate Change and the Role of Education, Climate Change Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 33–51. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32898-6_3
- Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854>

- Mateo, S., 2020. Procédure pour conduire avec succès une revue de littérature selon la méthode PRISMA – ScienceDirect. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S177901232030200X?via%3Dihub>
- Mulà, I., Tilbury, D., Ryan, A., Mader, M., Dlouhá, J., Mader, C., Benayas, J., Dlouhý, J., Alba, D., 2017. Catalysing Change in Higher Education for Sustainable Development: A review of professional development initiatives for university educators. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 18, 798–820. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-03-2017-0043>
- Paten, C.J.K., Palousis, N., Hargroves, K., Smith, M., 2005. Engineering sustainable solutions program: Critical literacies for engineers portfolio. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 6, 265–277. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370510607232>
- Rodriguez-Andara, A., Río-Belver, R.M., Rodríguez-Salvador, M., Lezama-Nicolás, R., 2018. Roadmapping towards sustainability proficiency in engineering education. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 413–438. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0079>
- Schumann, H., Berres, A., Stehr, T., Engelhardt, D., 2020. Effective Selection of Quality Literature During a Systematic Literature Review. *Informing Science* 23, 77–87. <http://dx.doi.org/10.28945/4551>
- Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *PNAS*. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>
- Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d’environnements numériques d’apprentissage de nouvelle génération (Habilitation à diriger des recherches). Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>
- Vargas, L., Mac-Lean, C., Hüge, J., 2019. The maturation process of incorporating sustainability in universities. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 441–451. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-01-2019-0043>
- Vautier Jean-François, 2001. Systèmes complexes Présentation générale. Techniques de l’ingénieur Management industriel base documentaire : TIP084WEB. <https://doi.org/10.51257/a-v1-ag1500>
- Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>
- Wise, C.K., 2010. Engineers of Tomorrow: Holistic-Thinking System Engineers, in: Grasso, D., Burkins, M.B. (Eds.), *Holistic Engineering Education: Beyond Technology*. Springer, New York, NY, pp. 227–241. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1393-7_17

Annexes

Liste des annexes

Annexes de la partie B « Revue de littérature »	96
Annexe 1 : Les niveaux de complexité	96
Annexe 2 : L'approche systémique de Donnalieu et Karsky	96
Annexe 3 : Parties prenantes et études associées	98
Annexe 4 : Les retours d'expériences	107
Annexe 5 : Les outils de formation des professeurs	119
Annexe 6 : Les barrières à l'innovation	121
Annexe 7 : Les barrières à l'adaptation	125
Annexes de la partie C « Application des résultats de la revue ».....	127
Annexe 8 : Grille d'analyse (vierge) pour outil d'intégration	127

Annexes de la partie B « Revue de littérature »

Annexe 1 : Les niveaux de complexité

Selon Garbolino et al., 2019¹²⁷, les systèmes complexes peuvent être de nature différente et peuvent être classifiés selon des *niveaux de complexité* :

- 1) Un système-objet passif, cad qui ne reçoit d’actions que de son environnement ;
- 2) Un système- objet actif, cad qui peut agir sur son environnement ;
- 3) Un système- objet actif et régulé, cad un système- objet actif comportant des boucles de rétroactions internes lui permettant de se stabiliser à la suite d’une action issue de son environnement ;
- 4) Un système-objet conscient, cad un système-objet actif et régulé capable d’agir sur son environnement dans l’objectif de s’assurer des conditions d’existence stables ;
- 5) Un système-objet gouvernant, cad un système-objet conscient capable de prendre des décisions basées sur des objectifs, et capable de développer une logique interne basée sur ses perceptions de son environnement ;
- 6) Un système-objet mémorisant, cad un système-objet gouvernant capable de retenir et d’interpréter des informations sur base d’autres informations connues ;
- 7) Un système-objet coordonné, cad un système-objet mémorisant capable d’exécuter des opérations selon un ordre méthodique et stratégique ;
- 8) Un système-objet auto-organisé, cad un système-objet coordonné capable de réformer sa structure ou son fonctionnement. Ce stade est caractérisé par l’apparition de l’*intelligence*, conçue comme la capacité à s’adapter à un changement brutal de son environnement ;
- 9) Un système-objet auto-finalisé, cad un système-objet autoorganisé capable de mettre en place des projets répondant à un objectif issu d’un processus de décision, et ce pour lui-même ou pour son environnement. Ce stade est caractérisé par la prise en compte de multiples critères et une méthode pour les concilier entre eux.

Annexe 2 : L’approche systémique de Donnalieu et Karsky

Trestini, 2016¹²⁸ décrit l’approche systémique de Donnalieu et Karsky au travers des phases suivantes :

- L’*exploration* est une première étape permise par la méthode de la *triangulation systémique*, c’est une étape nécessaire pour “entrer dans la complexité”. Lors de cette phase, on alterne entre trois aspects complémentaires d’un système : l’aspect structural (ses composants et leur

¹²⁷ Garbolino, E., Chéry, J.-P., Guarnieri, F., 2019. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools, in: Guarnieri, F., Garbolino, E. (Eds.), *Safety Dynamics: Evaluating Risk in Complex Industrial Systems*, Livres Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96259-7_1

¹²⁸ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d’environnements numériques d’apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

agencement), fonctionnel (à quoi il sert, ce qu'il fait) et historique (l'héritage et l'avenir du système). Grâce à cette procédure itérative, chaque aspect peut se renforcer des autres dans la compréhension du système qu'il apporte. Par exemple : certains aspects structuraux sont agencés d'une telle manière pour des raisons historiques, et découlent sur un fonctionnement particulier du système. Lors de l'exploration, il s'agit également d'identifier les principaux flux qui traversent le système (flux humains, de matière, d'informations, d'énergie, etc.) ;

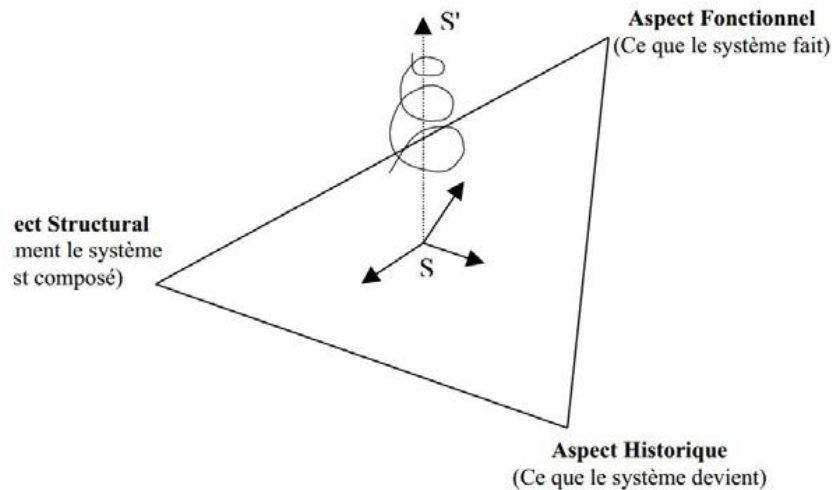


Figure A.1 : Méthode de la triangulation systémique de Donnalieu et Karsky (Trestini, 2016¹²⁹)

- La modélisation qualitative consiste à mettre au point une carte fidèle et utilisable du système, en mettant en évidence les éléments, les interactions, la délimitation du système et son environnement. Le *découpage systémique* est une sous-étape destinée à découper le système en sous-systèmes : par exemple si des frontières matérielles les séparent, s'ils ont des finalités différentes, ou si la nature des interactions qu'ont les éléments d'un sous-système est particulière. On parle de découplage lorsque, à l'inverse du couplage, on observe localement une interaction faible par rapport au reste des éléments du système (l'exemple du cloisonnement disciplinaire est représentatif de ce découplage) ;
- La modélisation dynamique consiste à formaliser le modèle qualitatif en un modèle opérant et utilisable. Il faut alors structurer la modélisation en elle-même et respecter les lois de construction propre à l'outil utilisé. Lors de cette formalisation, on introduit la dimension temporelle, dont la valeur de référence est souvent prise au moment présent. La simulation peut alors être lancée sur base d'une incrémentation de la variable temporelle.

¹²⁹ Trestini, M., 2016. Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Université de Strasbourg. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01432687>

Annexe 3 : Parties prenantes et études associées

A3.1 Les “program’s director”

Leifler et al., 2020¹³⁰ décrivent la place particulière que revêtent les *program’s directors*, que l’on pourrait traduire en Belgique par les présidents de commission de diplôme (PCD). Ils tendent à devoir concilier des contraintes et intérêts divers : entre des directives universitaires ou même nationales, entre les objectifs d’apprentissage et la nécessité de mettre en pratique un programme d’enseignement, et entre les différentes parties prenantes d’une commission. Aussi le fait d’identifier la situation de ces acteurs particuliers semble nécessaire à la transformation profonde de l’enseignement pour l’EDD.

Pour avoir réalisé cette identification lors de leurs recherches en Suède, les auteurs sont parvenus aux conclusions suivantes :

- Les réponses libres apportées par les présidents de commission de diplôme sur le développement durable et son implémentation suggèrent qu’ils avancent une conception centrée sur les besoins humains d’un tel développement, et surtout les besoins adressés aux ingénieurs. Une vision caractérisée d’anthropocentrée et matérialiste, dans la lignée de la durabilité dite « faible » ;
- Les principales motivations qui guident les décisions des présidents de commission de diplôme sont (par ordre d’importance décroissante) : leurs convictions personnelles, les attentes et attitudes des étudiants, les réglementations légales, les attentes et attitudes du corps académique, et enfin les recommandations pédagogiques ;
- Parmi les objectifs de développement durable (ODD), les objectifs liés à l’énergie ou aux infrastructures sont pointés comme ceux auxquels ils peuvent le plus contribuer (au travers de leur fonction de président de commission de diplôme), et ce selon 70% des répondants environ ; tandis que les objectifs sociaux sont plus souvent considérés comme inaccessibles à leur fonction, et ce selon 88% des répondants ;
- De manière générale, les PCD estiment que de simples compétences en matière de résolution de problème confèrent aux ingénieurs des compétences en DD ;
- Les PCD des programmes de master sont en général plus ouverts à répondre à des objectifs divers en dehors de l’archétype de l’ingénieur ;
- Selon eux, la principale contrainte déterminante dans la transition vers l’EDD est l’allocation de fonds pour développer de nouveaux contenus et se fournir du matériel adapté. Ils citent également le développement de compétences au niveau du corps académique.

Ainsi les PCD ont un profil caractéristique, et il s’agit de le prendre en considération dans l’identification de la nature des éléments constitutifs du système éducatif. Leur posture, ne correspondant pas toujours aux attendus de l’EDD, et étant mise face à des barrières spécifiques, nécessite un traitement particulier. Entre autres, le questionnement de leurs convictions personnelles, des rétroactions de la part des étudiants et la mise en place de nouvelles réglementations doivent faire partie de ce traitement. Aussi, il apparaît que les PCD ont un rôle important à jouer dans l’intégration

¹³⁰ Leifler, O., Dahlin, J.-E., 2020. Curriculum integration of sustainability in engineering education – a national study of programme director perspectives. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 21, 877–894. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-09-2019-0286>

des enjeux de DD dans l'enseignement, et ce du fait de leur position dans les processus de décision et de leur tendance à favoriser leurs convictions.

A3.2 Les professeurs

Byrne et al., 2013¹³¹ ont exploré les thèmes principaux décrits par les professeurs en école d'ingénieur considérés comme pertinents par rapport à l'EDD. Neuf catégories ont été créées afin de classer ces thèmes. Les participants ont par ailleurs été classifiés selon leur dominante (Chimie, Génie Civil, Mécanique, Electricité, IT, Autres).

Il a été demandé dans un premier temps aux professeurs de décrire trois compétences liées au DD qui sont importantes pour un ingénieur de leur discipline, en voici une sélection représentative décomposée selon les neuf catégories :

- Ressources - (R)
 - Prise en compte de la fin de vie/conception holistique
 - Reconnaissance des ressources renouvelables/non renouvelables
 - Stratégies d'écoconception, comment passer du produit au service
 - Capacité d'analyse énergétique du cycle de vie
 - Appréciation large du défi énergétique
 - Analyse du cycle de vie du produit
 - Compréhension approfondie des problèmes matériels
 - Comprendre les limites des ressources
 - Biomatériaux
 - Sécurité des ressources
 - Réutilisabilité, recyclage
- Pollution de l'environnement - (V)
 - Impact environnemental des matériaux/procédés
 - Impacts environnementaux
 - Effets de l'acoustique sur l'environnement
 - Élimination des déchets/atténuation des fumées
- Acteurs et parties prenantes - (A)
 - Compétences en communication
 - Leadership
 - Communication
 - Travail en équipe
- Valeurs/éthique/équité - (I)
 - Un sens de l'éthique micro et macro concernant l'électronique et les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)
 - Réduction de la gourmandise
 - Impératifs éthiques
- Technologie - (T)
 - Résolution inventive de problèmes/biomimétisme
 - Compréhension approfondie des problèmes de conception

¹³¹ Byrne, E.P., Desha, C.J., Fitzpatrick, J.J., Hargroves, K. "Charlie," 2013. Exploring sustainability themes in engineering accreditation and curricula. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 14, 384–403. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-01-2012-0003>

- Fabrication sobre et verte
- Pensée transdisciplinaire, systémique et complexe - (X)
 - Compréhension de la complexité et des systèmes complexes
 - Approche systémique globale
 - Conception du système complet
 - Évaluation et simulation des risques
 - Analyse critique
 - Thermodynamique
 - Capacité à estimer
 - Capacité d'évaluer l'impact des technologies actuelles et proposées
- Impact social - (S)
 - Impact sociétal de la prise de décision en ingénierie
 - Nécessité de communiquer la contribution des ingénieurs à la société
 - Sensibilisation aux impacts environnementaux et sociaux de l'électronique/TIC
 - Évaluation de l'impact du procédé
- Économie - (C)
 - Systèmes de gestion de la durabilité
 - Logistique verte
 - Compétitivité par la durabilité
- Éducation - (D)
 - Compréhension approfondie des concepts et des outils
 - Reconnaissance du couplage social/technique/ aspects économiques
 - Compréhension générale de la durabilité

Les résultats montrent de manière générale que les concepts liés aux ressources (R), aux valeurs/éthique/équité (I) et aux technologies (T) sont les trois les plus pertinents à l'EDD.

Les participants de la dominante Chimie ont les réponses les plus contrastées et les moins représentatives de leur dominante. Deux groupes assez hétérogènes ont émergé : l'un s'axe plus autour des notions technologiques (T) et de ressources (R) alors que l'autre s'axe autour de la pensée systémique (X) et de la prise en compte des parties prenantes (A). Les auteurs ont pu mettre en évidence un effet de "pensée de groupe" qui a mené à cette hétérogénéité. Par exemple, les dominantes mécaniques et Sciences des matériaux ont priorisé la dimension des ressources (R) et à l'inverse ont donné peu de crédit à la dimension valeurs/éthique/équité (I) ; à l'inverse des Electriciens et IT qui ont placé les valeurs/éthique/équité (I) au-dessus des ressources (R) avec un moins fort clivage.

Les participants étaient alors amenés à se prononcer, qualitativement et quantitativement, sur l'actuelle couverture des thèmes liés à l'EDD et si cette couverture leur semblait suffisante.

Il en est ressorti qu'une faible couverture des thèmes de « design durable des procédés et produits » et de l'« éthique environnementale » est effective. Une faible couverture est également faite des thèmes de « rôle social de l'ingénieur dans le progrès social », de « processus de décision systémique », de « gestion des ressources » ainsi que d'« enjeux interdisciplinaires ». Une couverture partielle des thèmes d'« énergie durable » et de « législations environnementales » est à noter.

Les auteurs écrivent :

Other areas mentioned included: "creative/flexible incentives to embed sustainability into teaching and learning", "student projects, staff rewards, leadership/college commitment", "professional development leading to competencies (evaluation effectiveness?)", "making

implicit more explicit”, “*awareness of SD in earlier years*”, “*global/local awareness – motivation*”, “*materials/life cycle management/product design*”, “*thermodynamics*”, “*alternative energy*”, “*problem solving skills/decision making processes*”, “*renewable energy – power*”, “*recyclability/reusability – extending life cycle (resource management)*”, “*exploitation – knowing limits – smart meter technology, smart systems technologies*”, “*exposure and awareness*”, “*knowledge*” (of sustainability/SD), “*commitment to practice, and influence, agents of change*”, “*validation tools – whole system solutions*”, “*new thinking on chemistry (molecular transformation)*”.

Il en ressort qu’aucun des professeurs interrogés n’estime que leurs universités répondent, au travers du cursus de formation de leurs étudiants ingénieurs, à la hauteur des enjeux de l’EDD. Ils estiment par ailleurs que les critères d’intégration de leur organisme d’accréditation ne peuvent pas permettre une telle intégration, ce qui relève toute la complexité de la tâche. Un large contraste existe parallèlement sur le rôle de ces organismes d’accréditation à baliser une telle intégration, certains estiment à ce titre que ce rôle doit être attribué aux universités directement.

Les professeurs ont donc naturellement un rôle à jouer dans l’EDD, cela les concerne plus que n’importe qui, et ce malgré qu’ils ne soient pas tout à fait libres dans leurs décisions. D’une part puisque les organismes d’accréditation ne soutiennent pas suffisamment cette démarche, et d’autre part du fait de l’existence de “pensées de groupe”. Il est cependant important de traiter chaque groupe de professeurs en fonction de leur discipline puisqu’elles ont un impact significatif sur les thématiques mises en avant. Il s’agit ici de sous-systèmes que l’on pourrait simplifier en les réduisant aux différents départements.

A ce titre, Linow et al., 2019¹³² décrivent trois orientations possibles que peut prendre un département au regard de l’EDD :

- *Business-as-usual* : caractérisé par une position *réductionniste* (inverse de holistique) de l’ingénierie, un optimisme technologique marqué, un désintéret pour les questions climatiques et environnementales et une croyance prononcée en le progrès technologique et la croissance économique. Cette orientation, actuellement la plus répandue, tend à simplifier le problème, à exclure toute considération complexe et à optimiser un nombre restreint de contraintes avant de proposer une solution ;
- *Systems engineering* : caractérisé par la prise en considération économique, sociale et environnementale dans le processus décisionnel, par une prise en compte des enjeux sociétaux de l’ingénieur et par une réflexion éthique et une déontologie systématique. Cette orientation tend à prendre en compte des contraintes locales extérieures au système conçu en intégrant diverses soft skills qui permettent d’identifier ces contraintes ;
- *Sustainable engineering science* : caractérisé par une importance particulière accordée aux problèmes pernicieux, un scepticisme envers les solutions purement techniques, et une approche systémique. Cette orientation tend à établir une réflexion sur le rôle sociétal de l’ingénieur et de l’appliquer concrètement dans les décisions prises, au travers de la prise en compte de l’impact à long terme et à grande échelle de leurs décisions, et avec une approche complexe et itérative.

¹³² Linow, S., 2019. Integrating Climate Change Competencies into Mechanical Engineering Education, in: Leal Filho, W., Hemstock, S.L. (Eds.), Climate Change and the Role of Education, Climate Change Management. Springer International Publishing, Cham, pp. 33–51. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32898-6_3

Des orientations diverses entre départements peuvent mener à des blocages dans la réforme en profondeur du cursus de l'étudiant ingénieur, principalement sur l'importance de traiter les problèmes pernicious, le dérèglement climatique ou l'éthique de l'ingénieur. A ce titre, les départements de mécanique sont rarement de bons élèves et mènent à des impasses structurelles dans l'intégration de l'EDD. Cependant le fatalisme reste le principal obstacle à cette intégration, là où toute initiative en faveur de cette intégration provoque un *effet d'entraînement*.

Traiter les sous-systèmes que représentent les départements en fonction de leur position actuelle sur ces trois niveaux, ainsi que sur la tendance sociale à faire l'impasse sur des éléments déterminants du DD, est nécessaire. Au sein des départements plus qu'autre part, l'effet d'entraînement est sensiblement déclenchant pour l'EDD, il s'agit d'en tirer profit.

A3.3 Les chercheurs

Les chercheurs ont bien entendu une place dans l'EDD, tant en tant qu'apprenant qu'en tant qu'enseignant. Ils sont à l'origine des productions de connaissances techniques locales pouvant être intégrées plus directement dans les programmes, et participent à l'effet d'entraînement au sein des départements décrit précédemment. De plus, le développement de connaissances non techniques par les chercheurs peut tout à fait s'intégrer dans la thématique de l'EDD, avec une démarche de terrain, et rendre ces connaissances directement applicables au système d'enseignement.

Clark et al., 2016 ¹³³ proposent le concept de « usable knowledge » dans le cadre du développement durable pour qualifier la production de connaissances dont la probabilité de déboucher sur une application durable est supérieure à une connaissance produite sans vocation à être appliquée. Ils constatent un décalage entre le besoin de connaissances utilisables présent dans la société et l'inaccessibilité de connaissances produites ayant pourtant la possibilité d'être appliquées. La transition vers une société plus durable nécessite donc que l'on rende ce décalage plus faible en produisant des connaissances utilisables et en rendant accessibles et intelligibles celles qui sont déjà disponibles.

Les auteurs décrivent un ensemble de fondements sur les connaissances utilisables que les chercheurs et professeurs gagnent à maîtriser dans le but d'établir une interaction forte entre les connaissances et les applications. La figure A.2 décrit les tenants de cette interaction.

¹³³ Clark, W.C., Kerkhoff, L. van, Lebel, L., Gallopin, G.C., n.d. Crafting usable knowledge for sustainable development. PNAS. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1601266113>

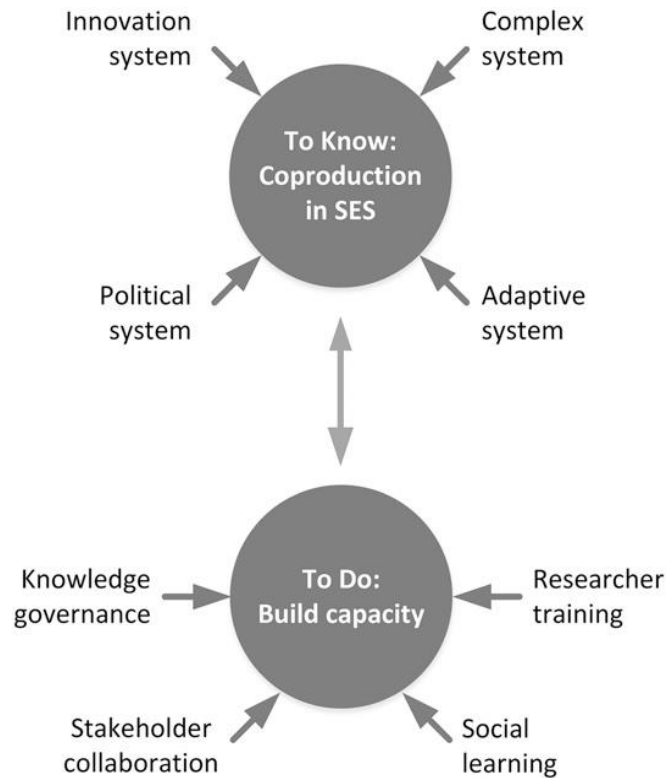


Figure A.2 : Cadre théorique pour l’aboutissement de connaissances utilisables (Clarka et al., 2016 ¹³⁴)

A l’origine de ces fondamentaux, on identifie des dynamiques du système couplé socio-environnemental (SEs: Social-environmental Systems) résurgentes des interactions entre des systèmes sociaux (population, économie, technologie, institutions, etc.) et des systèmes environnementaux (climat, écosystème, cycle biogéochimique). Les dynamiques émergentes du couplage entre ces systèmes sont appelées des coproductions et peuvent avoir des impacts sur l’effort des chercheurs et professeurs à produire des connaissances utilisables.

Les coproductions peuvent être issues des systèmes de natures différentes : Système d’Innovation, Système Complexe, Système Adaptatif et Système Politique. On appelle cette grille de lecture la “lentille ICAP”, elle nous permet entre autres d’établir un socle de connaissances bénéfiques à l’identification du contexte dans lequel une innovation est menée

- Le système d’**Innovation** doit être pris en compte dès lors qu’une innovation s’intègre dans un contexte technologique ou organisationnel plus large. Il faut alors être attentif aux besoins des usagers, prendre en compte le contexte local d’application et la rendre adaptable aux systèmes d’idées, de technologies et d’institutions existants. Entre autres, les efforts des chercheurs se heurtent aux modèles intuitifs de “transfert technologique” d’un domaine ou d’un contexte à un autre ; là où les auteurs conseillent davantage un modèle collaboratif, itératif et interactif ;
- Le système socio-environnemental à influencer est dit **Complexe** dès lors que des propriétés émergent de son fonctionnement ou de sa réactivité et qui ne peuvent être déduites des propriétés de ses composants. Stratégiquement, les auteurs suggèrent de ne pas poser d’actes isolés s’ils ne s’intègrent pas dans une vision plus globale, de suivre l’évolution du contexte au cours du processus de création et d’identifier les changements brusques et irréversibles

¹³⁴ Clark, W.C., Kerkhoff, L. van, Lebel, L., Gallopin, G.C., n.d. Crafting usable knowledge for sustainable development. PNAS. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1601266113>

provoqués par l'application d'une connaissance. Dans l'effort de cadrage, ils recommandent d'identifier clairement les conditions limites des systèmes socio-environnementaux comme la disponibilité variable d'une ressource ou d'un service, surtout lorsque des *dynamiques exogènes* se mettent en place (troubles politiques, changements climatiques, etc.) ;

- Le système socio-environnemental est également hautement **Adaptatif** face à chaque action menée ou non pour le déformer. Il faut alors prendre conscience que de la nouveauté est générée par de nombreux systèmes (sociaux ou environnementaux) mais cela n'en fait que rarement une innovation, car pour cela il faut qu'elle soit conçue et intégrée dans un système d'innovation. La sélection des nouveautés et innovations qui s'intégreront dépend alors de conditions locales, elles-mêmes résultant de l'intersection entre des conditions d'ordre et d'échelles supérieures. La dynamique qui façonnait le passé est par ailleurs rarement celle qui façonnera l'avenir. A la vue de la particularité des conditions de développement local, de la variabilité et de la sélectivité du système à intégrer, les auteurs expriment la nécessité de passer de critères d'évaluation d'une innovation tels que l'optimalité ou le contrôle à des critères de flexibilité et d'adaptativité ;
- Le système socio-environnemental comporte un caractère **Politique** fort, si bien que les chercheurs et professeurs sont susceptibles d'être désignés comme prenant pari au travers des connaissances qu'ils choisissent de développer ou de transmettre. Ces choix seront par ailleurs soumis à incitations de la part d'autres parties prenantes intéressées. Les chercheurs et professeurs doivent donc accepter le caractère politique de leur travail et que leur travail peut empiéter ou jouer sur les intérêts des parties prenantes ; car explicitement ou non, il y aura des aspects du problème qui seront ignorés. Cela peut également impliquer pour un chercheur de mettre ses compétences au profit d'un travail plus pratique et *de facto* moins valorisé.

Une fois les connaissances préalables établies et identifiées, il est possible pour un ingénieur d'agir en faveur de la production de connaissances utilisables grâce aux bonnes pratiques fournies par les auteurs ; ces pratiques permettent d'une part d'encapaciter les ingénieurs et d'autre part de leur donner les principales compétences nécessaires à la mise en application effective de leur innovation.

- La **collaboration avec un large éventail de parties prenantes** est une condition nécessaire à la production de connaissances utilisables car aucun ingénieur ne produit à lui seul des connaissances utilisables. En effet, une connaissance approfondie de toutes les dynamiques du système couplé socio-environnemental n'est à priori pas accessible à un seul individu. La connaissance produite est pas ailleurs évaluée selon leur saillance, leur crédibilité et leur légitimité au regard d'un tiers. Il est donc indispensable d'établir une compréhension commune de la connaissance utilisable. Mais au-delà d'une question de capacité, les auteurs avancent que ce n'est pas le rôle social d'un chercheur/concepteur que de produire seul des connaissances utilisables ; car il est établi que toute connaissance débouchant sur une application comporte une dimension sociale et éthique, ne serait-ce que dans la dimension où les décisions en faveur de la durabilité affectent la vie des utilisateurs ou des résidents. Pour tenir compte de ces dimensions, les auteurs mettent en avant la participation d'une collaboration de parties prenantes diversifiées, l'identification des spécificités du contexte local d'innovation et l'identification des points de divergence d'origine culturelles entre parties prenantes ;
- L'**apprentissage social en continu** est une pratique déclenchante dans le processus d'innovation. Et ce pour quatre raisons apparentes :
 - Autant les individus seuls peuvent favoriser dans leurs recherches les connaissances basées sur la science plutôt que sur l'utilisabilité, autant l'apprentissage social permet

- une approche multidimensionnelle et évolutive de problèmes complexes qui favorise l'utilisabilité d'une connaissance ;
 - Il est globalement plus efficace de concevoir l'espace de recherche comme sécuritaire au regard des erreurs commises par les chercheurs, et cela nécessite des innovations sociales dans l'organisation et l'évaluation du travail mené ;
 - Une méthodologie de recherche basée sur le partage, le dialogue et sur l'adaptabilité d'une recherche est également profitable à la production de connaissances utilisables ;
 - Favoriser l'apprentissage social nécessite enfin d'analyser et de critiquer les institutions qui ne la favorisent pas de sorte à en tirer des leçons.
- La **gouvernance** de l'institution en matière de recherche, désireuse de produire des connaissances utilisables, joue un rôle particulier dans le processus de production, de partage, d'accès et d'utilisation d'une connaissance. Les auteurs conseillent aux systèmes de gouvernance d'assurer une connectivité importante entre les sites/les départements, d'augmenter d'échelle la stratégie de recherche et de privilégier les solutions structurelles aux problèmes rencontrés par les chercheurs. Les auteurs mettent également en garde sur le fait que l'identification d'un problème de gouvernance est complexe et apparaît souvent sous une autre forme ;
 - La **formation en continu** des chercheurs et des professeurs est également importante lorsqu'elle permet d'apprendre à produire des connaissances utilisables par des voies formelles ou non. Entre autres, les connaissances dites "non académiquement rigoureuses" sont cependant souvent utilisées en pratique et la rigueur peut autant être un moteur qu'un frein à la création de connaissances utilisables.

Il est à noter que toutes ces lignes directrices sont autant valables pour les chercheurs que pour les professeurs, surtout lorsque les professeurs sont eux-mêmes engagés dans des programmes de recherche et bien souvent à des postes à responsabilité comportant un pouvoir décisionnel fort.

A3.4 Le comité de pilotage

Linow et al., 2019¹³⁵ décrivent l'importance d'implémenter un comité de pilotage pour mener l'intégration des enjeux de DD.

Ses principaux objectifs sont de :

- Se développer/ se former ;
- Concevoir des options de stratégies d'intégration ;
- Sensibiliser et engager la communauté universitaire ;
- Promouvoir l'intégration de la durabilité au sein des programmes et au sein du positionnement pédagogique de la faculté ;
- Coordonner et soutenir les différentes parties prenantes dans leur implication et dans l'analyse de leurs résultats.

La principale ligne directrice du comité tout au long du processus est la flexibilité des exigences/conditions d'intégration, qui ont par ailleurs résurgé d'évaluations de modules implémentés par les étudiants eux mêmes. Ces dernières peuvent être résumées en :

¹³⁵ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

- Des exigences de connaissances : Les membres développent la capacité de converser de manière éclairée sur les dimensions et sur la complexité de la durabilité ;
- Des exigences de compétences : Les membres peuvent évaluer la durabilité d'un produit/d'un service en utilisant une approche disciplinaire fondée sur des critères quantifiables et intégrer des perspectives économiques, écologiques et sociales dans leur analyse ;
- Des exigences en termes de valeurs : Les membres développent une pensée critique sur la durabilité à travers une diversité de valeurs culturelles et à travers de multiples échelles de spatiales et temporelles ;
- Des exigences dans le domaine personnel : Les membres, en tant que citoyens, peuvent évaluer l'impact de la durabilité sur leur vie et l'impact de leurs actions sur la durabilité.

A3.5 Les étudiants

Les étudiants interviennent à plusieurs niveaux dans l'intégration des enjeux de DD dans leur cursus, et au travers de nombreuses rétroactions et évaluations. Avec les PCD, les professeurs et le comité de pilotage comme décrit ci-dessus, mais également lors de l'évaluation de modules d'EDD pilotes, comme décrit dans la section 6.3 « Retours d'expériences ».

Les étudiants constituent un sous-système a priori récepteur dans un système d'enseignement transmissif, mais il en est différemment pour un système plus participatif comme les méthodes d'enseignement constructivistes et connectivistes le proposent (cf. section 6.2 « Méthodes d'enseignement »). Ces méthodes se distinguent des autres par leur tendance accrue à se centrer sur l'apprenant, à l'inverse des méthodes transmissives centrées sur l'enseignant. Cette tendance (centrée sur l'apprenant) permettrait de conférer un rôle bien plus actif dans la transition vers l'EDD aux étudiants, qui pour l'instant gardent un rôle principalement récepteur.

A3.6 Les intervenants externes

Nous avons déjà parlé de parties prenantes externes dans le cadre de la recherche, mais l'EDD comprend de nombreux acteurs périphériques, plus la plupart locaux et spécifiques à chaque établissement.

Cependant, à l'échelle fédérale ou nationale, de nombreuses parties prenantes au système d'éducation interviennent et influent sur l'intégration des enjeux de DD dans la formation des ingénieurs.

Il existe également des organismes dont le rôle est de guider les universités dans leur transition vers l'EDD. En Belgique, ces organismes ne sont pas encore suffisamment développés, c'est pourquoi nous allons nous tourner du côté de la France qui est bien plus avancée sur ce point. En particulier, et dans un souci d'actualisation, en s'intéressant aux rapports "Sensibiliser et former aux enjeux de la transition écologique et du développement durable dans l'enseignement supérieur. Fév. 2022" de **Jean Jouzel** (<https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-39466-rapport-former-aux-enjeux-de-la-transition-ecologique.pdf>) et le "Guide Pour l'intégration des enjeux socio-écologiques en formation d'ingénieur. FORMER L'INGÉNIEUR DU XXIe SIÈCLE. Vol 2. Mars 2022" publié par **The Shift Project** (<https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/03/GUIDE-version-Web-FINAL-04032022.pdf>).

Lors de cette même annexe, le point A4.3 « Les chercheurs » détaille également l'importance de prendre davantage en compte de parties prenantes extérieures.

Annexe 4 : Les retours d'expériences

Patel et al., 2005¹³⁶ font une proposition d'intégration du DD dans le cursus des étudiants ingénieur au travers de la figure A.3. Ce programme est détaillé dans l'ouvrage « The natural advantages of nations » de Karlson Hargroves et Michael Harrison Smith.

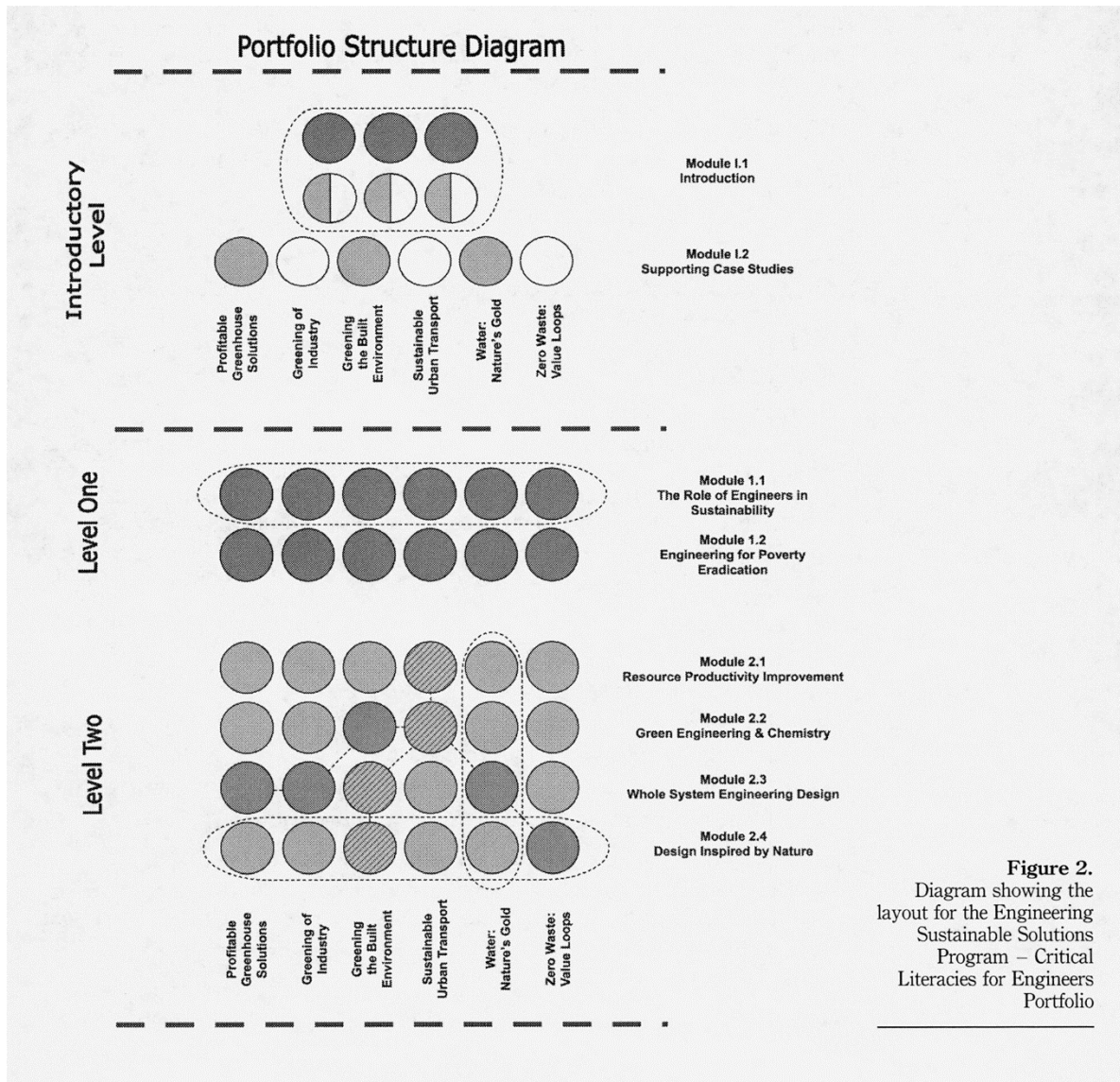


Figure 2. Diagram showing the layout for the Engineering Sustainable Solutions Program – Critical Literacies for Engineers Portfolio

A.3 : Portfolio de Hargroves et Smith (Patel et al., 2005¹³⁷)

¹³⁶ Paten, C.J.K., Palousis, N., Hargroves, K., Smith, M., 2005. Engineering sustainable solutions program: Critical literacies for engineers portfolio. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 6, 265–277. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370510607232>

Les modules du premier niveau sont une introduction aux enjeux auxquels la profession d'ingénieur fait face. Un premier module s'axe autour des implications contrastées du métier d'ingénieur dans le contexte des pays développés et en voie de développement, et un second module s'attèle aux aspects techniques de l'ingénierie durable au travers d'études de cas. Les niveaux suivants sont composés d'un approfondissement des notions abordées lors du niveau d'introduction où l'on explore des dimensions techniques, environnementales et sociales au travers d'une discipline. Le niveau deux s'attèle en fin de parcours à briser le cloisonnement disciplinaire par des modules conjoints pour une des dimensions explorées ou en réalisant des liens d'un module à l'autre et d'une dimension à l'autre.

Pour soutenir chaque module, le portfolio s'accompagne des *ressources* décrites à la figure A.4.

Educational aim	This provides a short snapshot of intent, or the “key message” for this part of the technical unit. The trainer may use this as an introduction to the class
Learning points	The learning points list the key items to cover during this part of the technical unit. The text has been formatted so that it can be easily copied on to overhead slides, used in hand-outs or referred to in a workshop environment
Brief background information	Brief background information is supplied to the trainer, to provide some context to interpret the key learning points. It also indicates the type of information contained in the recommended references and resources Often, this material explains terminology further, or gives background information to help further explain concepts in case students find the material difficult to understand. This additional information could also be used to prepare student hand-outs, or as additional reading for students
Key references	This list is very important as a summary of where key information has been sourced, and where more information on related topics can be found
Key words for recommended web sites	Keywords have been provided as well as web site addresses, due to the amount and frequency of address changes on the internet. With the vast search capabilities of current search engines, a search on these key words will also list the most current material available on the topic of interest
Assessment questions and activities	A number of questions and activities have been provided for each part of a technical unit, to help check whether the students have understood the key terms and content. The questions are intended to be memory aids, to be used as a quick quiz at the end of the unit, or at the end of each part of the unit, depending on the preferred teaching style. The activities could be undertaken as a workshop session, or could be carried out by the students as “homework” or a short take-home assignment

Figure A.4 : Ressources de Hargroves et Smith (Patel et al., 2005¹³⁸)

¹³⁷ Paten, C.J.K., Palousis, N., Hargroves, K., Smith, M., 2005. Engineering sustainable solutions program: Critical literacies for engineers portfolio. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 6, 265–277. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370510607232>

¹³⁸ Paten, C.J.K., Palousis, N., Hargroves, K., Smith, M., 2005. Engineering sustainable solutions program: Critical literacies for engineers portfolio. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 6, 265–277. <http://dx.doi.org/10.1108/14676370510607232>

Les principales conclusions de l'intégration de ce portfolio sont les suivantes :

- Une adaptation au niveau de connaissance des étudiants pour chaque module est importante et a surtout été menée avec succès pour le niveau d'introduction. Les participants à ce module d'introduction ont noté que le contenu de ce module était semblable à n'importe quel autre cours ;
- Les étudiants ont globalement appris plus rapidement au fur et à mesure que les discussions étaient ressourcées, challengeantes et engageantes ;
- Les étudiants ont noté un certain nombre d'informations et de réflexions qui leur sont utiles au présent et possiblement à l'avenir dans leur parcours.

Hill et al., 2018¹³⁹ décrivent le processus d'intégration de l'EDD à l'université du Vermont à Burlington, de l'identification à la maturation du projet. La figure A.5 décrit ce processus dans son ensemble. On y retrouve en parallèle les principales dynamiques institutionnelles permettant chaque phase de l'intégration.

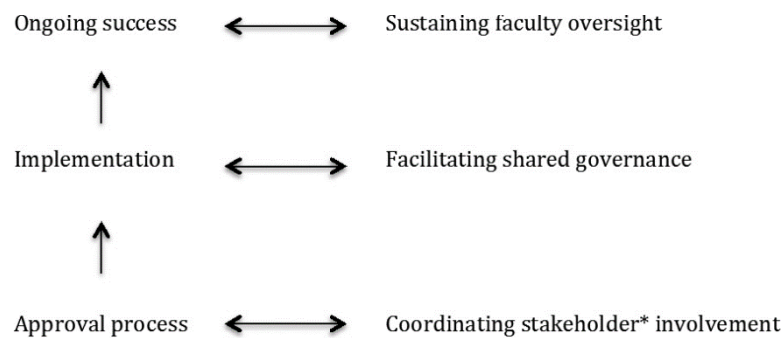


Figure A.5 : Processus d'intégration à l'université du Vermont (Hill et al., 2018¹⁴⁰)

Au total, et de manière plus détaillée, ce sont plus de 25 stratégies qui ont été mises en place au cours de l'intégration qui s'est étalée de 2009 à 2017, comme répertoriées à la figure A.6.

¹³⁹ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

¹⁴⁰ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

Year	Action
2009	First cohort of Sustainability Faculty Fellows (SFF) are recruited for the one-year professional development program
2010	SGA resolution calls for a university-wide sustainability requirement
2012-2014	SLO <i>ad hoc</i> committee forms with co-chair model meets biweekly for three semesters
2013-2014	<i>Open feedback solicited on draft SLOs</i> Dissemination of SLO committee working wiki site Open for a for students and faculty Blog soliciting faculty feedback on SLOs SLO committee presents regularly to Faculty Senate SLO committee presents to SGA
Spring 2014	<i>First Faculty Senate votes on sustainability requirement solicited</i> SGA and Faculty Senate approve SLO Official formation of the SCRC, a subcommittee of the Faculty Senate; dissolution of the SLO ad-hoc committee
2014-2015	<i>Second Faculty Senate votes on sustainability requirement solicited</i> SCRC develops structure and policies of proposed SU requirement SCRC finalizes UVM's sustainability definition SCRC develops sustainability proposal process for instructors SCRC presents regularly to Faculty Senate on proposed sustainability requirement SCRC addresses faculty concerns, including capacity and assessment, and reports back to Senate SCRC reviews existing STARS™ sustainability-focused courses as one-year provisional sustainability (SU)-designated courses to build course capacity
Spring 2015	Faculty Senate approves a new sustainability requirement for all students entering in Fall 2015
2015-2016	<i>Implementation of sustainability general education requirement</i> SCRC solicits and reviews proposals for SU approval SCRC works with various stakeholders (including SFF) to build academic capacity in the curricular and experiential pathways SCRC garners administrative support for general education as a whole Sustainability General Education Assessment Committee is formed SCRC regularly presents findings to Faculty Senate (e.g. model SU course capacity was exceeded for 2015-2016)
2016-2017	<i>Maintenance of sustainability requirement</i> SCRC policies are developed SCRC proposal solicitation and review continues General Education Coordinating ad-hoc committee forms General Education assessment continues university-wide

Figure A.6 : Stratégies menées dans le cadre de l'intégration à l'université du Vermont (Hill et al., 2018¹⁴¹)

Ces stratégies, malgré qu'elles suivent un ordre logique d'approbation/implémentation/pilotage, ont dû être menées en parallèle et en continu pour certaines, ce qui représente une véritable difficulté. Les points essentiels du succès sont selon les auteurs :

- La conception du programme, y compris la structure et l'ordonnancement des exigences ;
- Les mécanismes d'évaluation enclenchés à un moment opportun ;
- Le positionnement de la supervision par le corps professoral.

Au fur et à mesure de l'intégration des enjeux de DD dans le cursus d'enseignement de l'ingénierie, le comité de pilotage était en mesure d'argumenter avec les membres de commission les plus sceptiques

¹⁴¹ Hill, L.M., Wang, D., 2018. Integrating sustainability learning outcomes into a university curriculum: A case study of institutional dynamics. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 699–720. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0087>

au regard de leurs résultats et au travers des compétences interpersonnelles que le comité a acquis lors du processus d'intégration. C'est un exemple concret de l'effet d'entraînement.

Rodriguez et al., 2018¹⁴² ont suivi et analysé l'intégration de programmes d'EDD dans certaines écoles d'ingénieurs. Ils ont répertorié et analysé cette intégration au travers de « feuilles de routes » (*roadmaps*) faisant état des modules reçus selon l'avancement dans le cursus.

Cette approche permet de concilier des objectifs à moyen et à long terme, ce qui est très pratique pour un système de gouvernance. Les feuilles de route ont déjà largement été utilisées dans l'industrie pour le développement d'un nouveau produit, mais peuvent être utilisées plus largement pour la planification stratégique globale pour aligner l'état actuel avec une vision souhaitée.

La feuille de route nécessite en amont de répondre à trois questions fondamentales : « Ou en est-on ? », « Ou veut-on aller ? » et « Comment pourrait-on y aller ? ». Ces questions peuvent ensuite être décomposées en étapes à franchir et en catégories thématiques (comme Technologie, Produit, Procédé et Marché). Cette approche reste cependant soumise à des *biais* personnels ou propres à l'organisation.

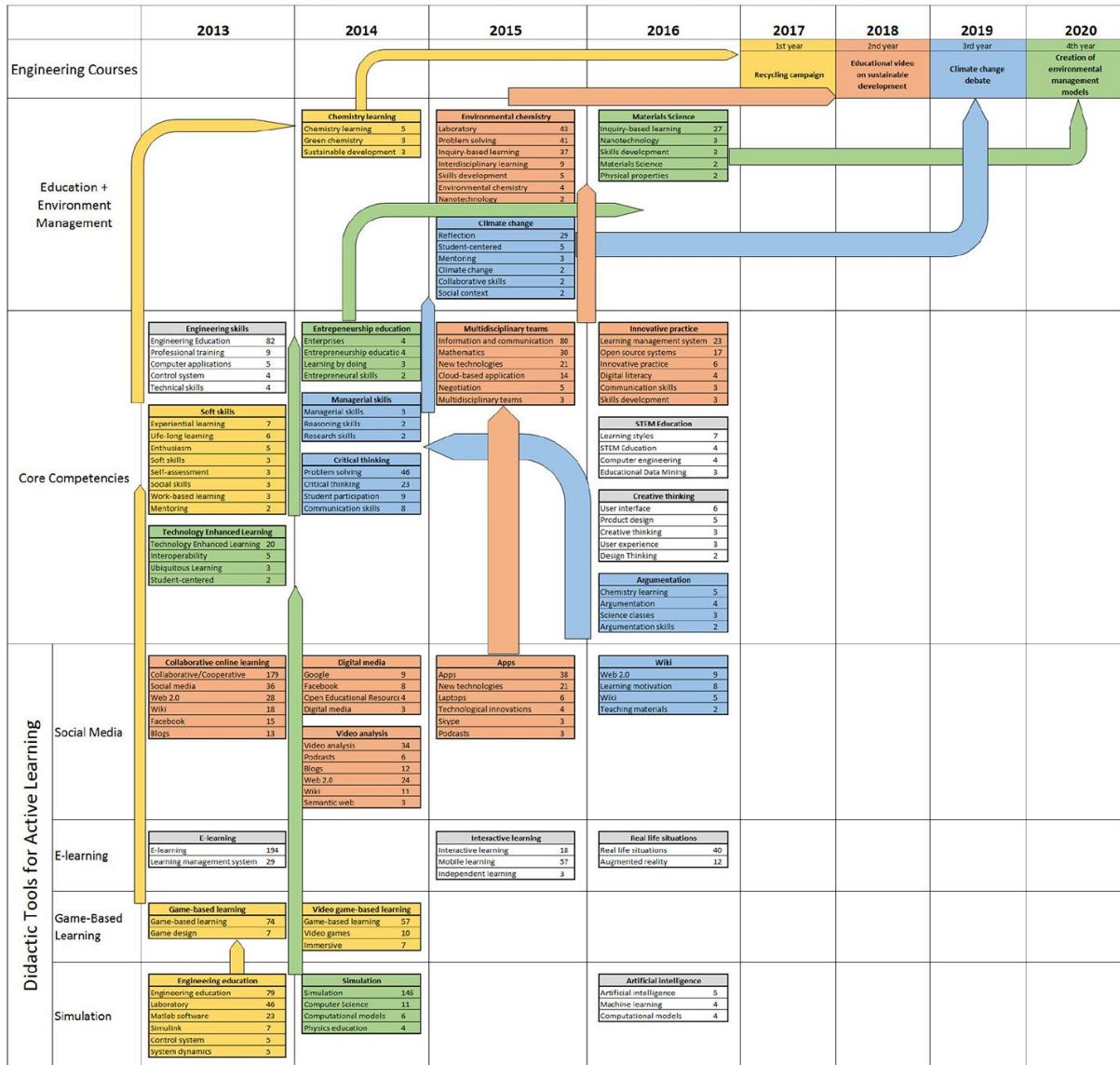
Pour quantifier les résultats, les auteurs ont répertorié tous les termes et liens entre termes proposés dans la littérature scientifique puis les ont comparés aux productions d'étudiants et d'organisations. Cette méthode a permis d'identifier que quatre principaux efforts étaient à mettre en place pour l'EDD :

- Le développement d'une sensibilité et d'une conscience au DD
- La transformation du comportement des étudiants en propagateurs des connaissances liées au DD
- L'élaboration d'une pensée critique et de compétences d'argumentation
- La résolution en interne de problèmes environnementaux au travers de modèles de management durable

La figure A.7 illustre l'intégration des programmes résultants correspondants au cours du temps. Ces programmes ont été dimensionnés selon les principaux résultats de recherche ci-dessus, et structurés en couches (*layers*) de la plus basique et intuitive (jeux, simulations, réseaux sociaux, etc.) à la plus développée et détaillée (constitution de cours en école d'ingénieur). Cette structuration a permis de passer d'une couche à l'autre et ainsi de concevoir, pour le programme de chaque année d'étude, des cours/modules intégrés.

¹⁴² Rodriguez-Andara, A., Río-Belver, R.M., Rodríguez-Salvador, M., Lezama-Nicolás, R., 2018. Roadmapping towards sustainability proficiency in engineering education. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 413–438. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0079>

Sustainability innovation pathways in engineering degrees



Notes: Arrows indicate skills flow to be developed from “didactic tools for active learning” to “core competences”, to then be carried out in engineering subjects in “education + environment management” to finally be implemented in annual “engineering courses”. Yellow, orange, blue and green arrows correspond to first, second, third and fourth annual year in engineering studies, respectively

Figure A.7 : Application de l’outil roadmaps à la conception de cours pour étudiants ingénieurs (Rodriguez et al., 2018¹⁴³)

Un exemple plus concret de programme, avec comme objectif de former les étudiants ingénieurs à la résolution de Problèmes Pernicieux de Durabilité, est proposé par Vemury et al., 2018¹⁴⁴ avec

¹⁴³ Rodriguez-Andara, A., Río-Belver, R.M., Rodríguez-Salvador, M., Lezama-Nicolás, R., 2018. Roadmapping towards sustainability proficiency in engineering education. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 413–438. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-06-2017-0079>

¹⁴⁴ Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>

l'Apprentissage par Projets (APP) tel qu'enseigné à l'Université de Newcastle. Son principal objectif est de déployer des connaissances et des compétences appliquées afin de développer une solution viable à un problème donné.

Dans le cadre de la conception durable d'une installation, le module DSES2 de l'université de Newcastle propose une série de lectures préalables au projet d'APP permettant aux étudiants de structurer leur travail, de prendre un maximum de dimensions en compte et de cadrer le travail. Il y était question, pour un projet de Génie Civil, de prendre en compte des dimensions comme : l'étude de faisabilité, la conception préliminaire ou préprojet, le dérèglement climatique et la résilience des installations, l'étude d'impact environnemental ainsi que des conditions économiques sur l'estimation des coûts (Capex et Opex).

Un suivi régulier par des assistants et sur demande des étudiants, ainsi que le choix d'objectifs précis sont également mis en place le long de la réalisation du projet. Les membres de l'équipe de pilotage ont noté l'impact significatif de cette procédure de suivi sur la qualité des résultats. Chaque suivi peut alors contribuer à l'évaluation du projet au travers de critères de méthodologie. L'évaluation est alors complétée par les étudiants (auto-évaluation) et par des professeurs et experts invités à leur présentation.

Entre autres choses, L'UNESCO estime le rôle de l'APP dans l'éducation au développement durable au même titre que l'enseignement des sciences de l'ingénieur au sens large.

Une Seconde étude, celle de Guerra, 2017¹⁴⁵, développe le concept d'Apprentissage Par Projets. Il est décrit comme *centré sur l'apprenant* à la différence de l'apprentissage *centré sur l'enseignant*.

Les étudiants y sont invités à former des petits groupes et à identifier un problème basé sur un contexte existant et formulé de manière « mal structurée » (par opposition aux problèmes “bien structurés” qui contiennent toutes les données nécessaires et indiquent la méthodologie à suivre). Les étudiants ayant formulé leur problème sont alors amenés à identifier et appliquer les connaissances disciplinaires disponibles nécessaires à sa contextualisation. Au cours de ce processus, les étudiants rencontrent des problèmes ou sont soumis à des critiques qui désignent un manque de connaissance sur une discipline impliquée dans leur problème et ont la charge de se renseigner pour compléter leurs connaissances. Des compétences organisationnelles et interpersonnelles sont par ailleurs sollicitées, comme la mise en application et la planification qui l'accompagne, l'élaboration de stratégies, le développement d'une méthode de travail, la gestion de la collaboration au sein du groupe, l'application de critères ou de procédés démocratiques pour la prise de décision, l'analyse d'intégration et l'évaluation des solutions conçues et enfin la proposition d'une solution structurée.

L'APP soutient et développe des compétences pertinentes (à droite sur le graphique) au regard des principes d'apprentissages requis par l'EDD (à gauche dans le graphique), comme illustré à la figure A.8.

¹⁴⁵ Guerra, A., 2017. Integration of sustainability in engineering education: Why is PBL an answer? International Journal of Sustainability in Higher Education 18, 436–454. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2016-0022>

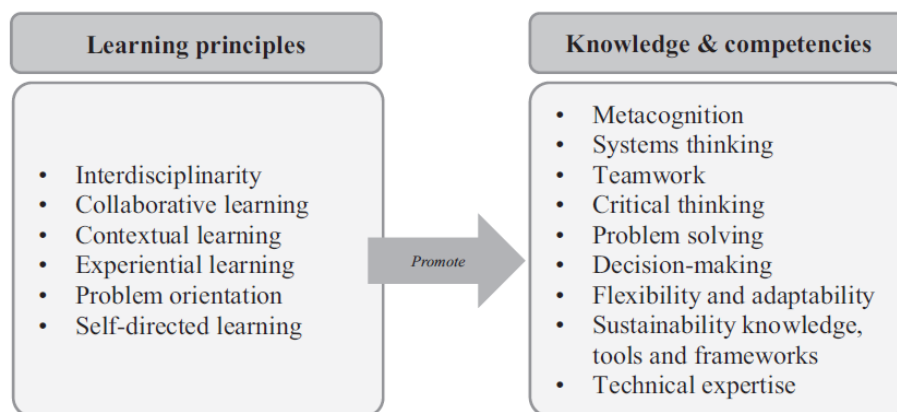


Figure A.8 : Développement de connaissances et de compétences grâce à l’APP (Guerra, 2017¹⁴⁶)

Pour témoigner de la bonne mise en application des principes d’apprentissage, les auteurs ont mené une étude qualitative basée sur les réponses à une questionnaire adressé à toutes les parties prenantes du programme d’APP. Il en ressort que les critères permettant d’effectuer efficacement cette application sont décrits à la figure A.9.

Learning principles	Criteria	Example of indicators
Contextual learning	Real-life situations, professional contexts, real practice, etc	–
Self-directed/participant-directed	Independent learner, responsible for own learning, etc	–
Collaborative learning	Teamwork, work with others, group work, etc	–
Interdisciplinary learning ^a	Disciplinary, cross-disciplinary, multidisciplinary, interdisciplinary, transdisciplinary	Knowledge within engineering field, ... Aware of other discipline work, ... Combines methods and approaches from different disciplines, ... Two disciplines merge to create a new one, ...
Sustainability ^b	Environmental, social and economic	Energy, water, materials Human rights, non-discrimination Market presence, customer privacy...

Figure A.9 : Critères permettant d’évaluer le développement de compétences (Guerra, 2017¹⁴⁷)

Les principaux défauts attribués à l’APP, selon les résultats de l’expérience, sont :

- La médiation insuffisante de la conflictualité entre les concepteurs du programme et les décideurs pour le cursus existant ;

¹⁴⁶ Guerra, A., 2017. Integration of sustainability in engineering education: Why is PBL an answer? International Journal of Sustainability in Higher Education 18, 436–454. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2016-0022>

¹⁴⁷ Guerra, A., 2017. Integration of sustainability in engineering education: Why is PBL an answer? International Journal of Sustainability in Higher Education 18, 436–454. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2016-0022>

- Le manque de cadre apporté par les encadrants ;
- Le défi d'équilibrer les dimensions économiques, environnementales et sociales ;
- Un dialogue interdisciplinaire limité ;
- La présence limitée de la durabilité en tant que telle.

Dans un autre registre, Lourdel, 2005¹⁴⁸ propose comme exemple principal un apprentissage au DD au travers des jeux de rôles, comme illustré à la figure A.10. Ce dernier s'est organisé comme suit :

- Une décomposition aléatoire des étudiants en groupes de trois ou quatre ;
- Une répartition libre des postes au sein de chaque équipe ;
- Chaque groupe se voit assigner un rôle et des objectifs en tant que partie prenante d'un projet industriel (incinération de farines animales dans un four de cimenterie) : les industriels, les représentants de la société civile, les acteurs publics et les consultants ;
 - Le groupe des industriels se voit fournir des ressources concernant les règlementations, le procédé en lui-même et le développement durable dans les grandes lignes. Ils doivent ensuite identifier les différents projets possibles répondant à leur besoin et les intérêts des différentes parties prenantes ;
 - Le groupe de la société civile recevait un ensemble de considérations et de revendications portées par le reste de la population ;
 - Les acteurs publics recevaient des ressources au sujet de la législation et de la politique environnementale, et devaient s'assurer de les faire respecter ;
 - Les consultants avaient pour rôle de relayer les informations et les attentions des différents groupes entre eux, ainsi que d'aider les industriels à formaliser leur projet. Aussi, ils ont été chargés de se renseigner sur les principes du développement durable et leur applicabilité au projet.
- Les différents groupes ont alors dû réaliser leurs projets respectifs en interne et en concertation avec les autres groupes. Leurs lignes directrices quant à leurs interactions ont été la mise en pratique des principes du DD, de communication, de précaution, de prévention et de participation.

¹⁴⁸ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

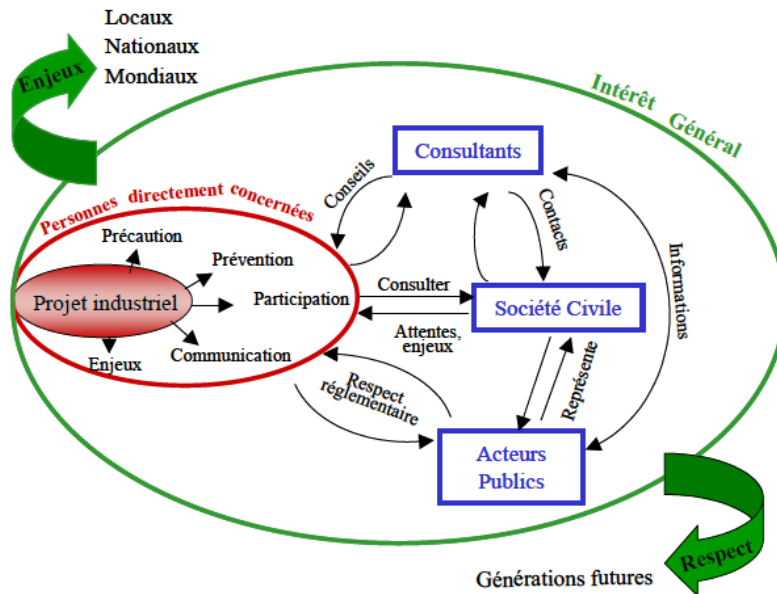


Figure A.10 : Schéma du jeu de rôle de Loudel (Lourdel, 2005¹⁴⁹)

Les principaux résultats de cette expérience ont été que :

- Certaines applications du DD ont pu être aisément développées, comme les parties prenantes intéressées, les enjeux et attentes des autres acteurs, la responsabilité sociétale de l'ingénieur, les problématiques de développement local, etc. ;
- Les difficultés rencontrées ont été la gestion d'une grande quantité d'informations et la nécessité d'en trouver d'autres par soi-même, la prise de position en parallèle avec l'ouverture, la mise en place d'une bonne organisation et d'une équitable répartition des rôles, et la gestion du conflit ;
- Certaines notions du DD ont été négligées, comme l'équité, la prise en compte des besoins des acteurs faibles du DD, la gouvernance, l'écologie. Entre autres, il a été remarqué que les dimensions techniques ont systématiquement été priorisées, au détriment des dimensions globales ;
- Globalement, tant les étudiants que les organisateurs se sont rejoints pour dire que le jeu de rôle est une bonne manière de se confronter aux difficultés liées au DD, là où elles apparaissent bien plus faciles lors d'un cours, même dédié.

Lourdel met également en évidence qu'un outil d'évaluation des programmes d'éducation au développement durable est nécessaire au pilotage de l'intégration des enjeux DD dans la formation des ingénieurs (mise en place d'une rétroaction pour le système de pilotage). Elle propose alors la notion de carte :

« Une carte est une représentation graphique de la représentation mentale que se fait une personne d'un sujet. Les cartes se composent de deux éléments : des concepts traités comme des variables et des liens, le plus souvent d'influence (ou de causalité) unissant certains des concepts.

¹⁴⁹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

(...)

Les cartes peuvent être distinguées en fonction de leur utilisation :

- *les cartes utilisées comme méthode pour visualiser et enregistrer des informations,*
- *les cartes composites ou de synthèse qui peuvent être analysées ou interprétées dans le cadre de recherche didactique,*
- *les cartes modèles, résultats de recherche, qui propose une représentation spatiale de concepts comme modèles de référence.*

(...)

Les cartes cognitives sont définies comme une manière de représenter les points de vue d'une personne dans un domaine ciblé. Les cartes permettent de représenter les relations d'influence entre différentes notions abordées par quelqu'un. Les cartes sont parfois présentées comme des outils de négociation facilitant la réflexion et la prise de décision. » (Lourdel, 2005¹⁵⁰)

C'est ce dernier type de carte que Lourdel met en avant comme méthode d'évaluation des programmes d'EDD. Elle se base pour cela sur le *courant cognitiviste* pour lequel les connaissances issues d'un apprentissage sont fonction des connaissances préalables de l'individu. Ainsi, les connaissances sont d'autant mieux intégrées dès lors que l'apprenant peut les rattacher à des schémas de pensées préexistants. La carte cognitive apparaît dès lors comme un moyen d'externaliser les connaissances acquises dans le contexte environnant des connaissances préalables d'un individu. L'effort de représentation constitue également un moyen de formaliser et retenir la construction mentale développée lors de l'activité. Il peut être caractérisé d'exercice de dé-complexification. La carte cognitive s'inscrit dans le mouvement plus global dit de *métacognition* au sein duquel un individu réalise une représentation de sa propre cognition, et qui constitue un outil d'identification des connaissances d'un étudiant pour un enseignant.

La figure A.11 est un exemple de carte cognitive rédigée par un étudiant dans le cadre de l'étude sur les cartes mentales.

¹⁵⁰ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

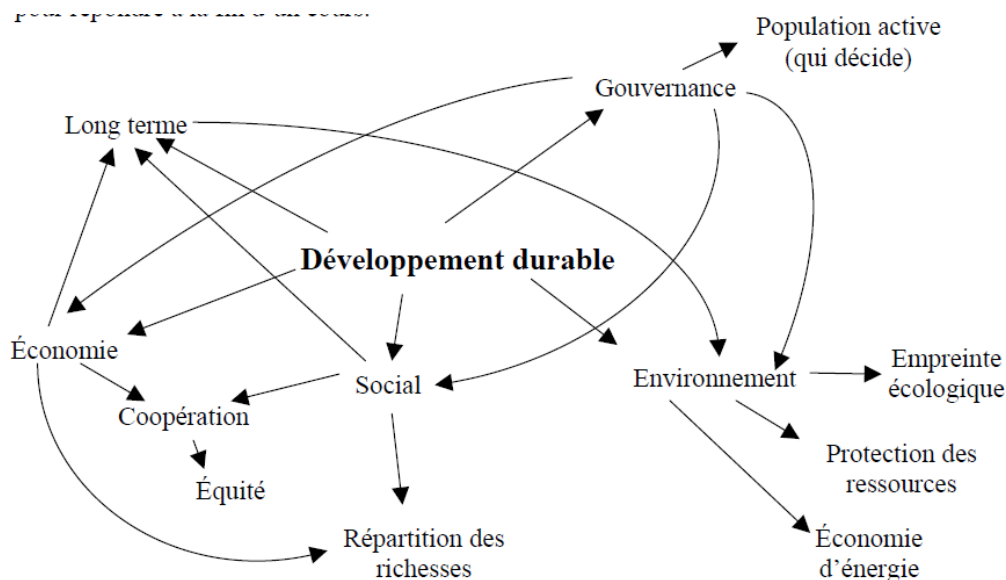


Figure A.11 : Exemple de carte cognitive réalisée par un étudiant (Lourdel, 2005¹⁵¹)

La figure A.12, elle, représente une décomposition et une évaluation en six axes selon la proportion et la richesse des termes et des liens utilisés dans une carte cognitive.

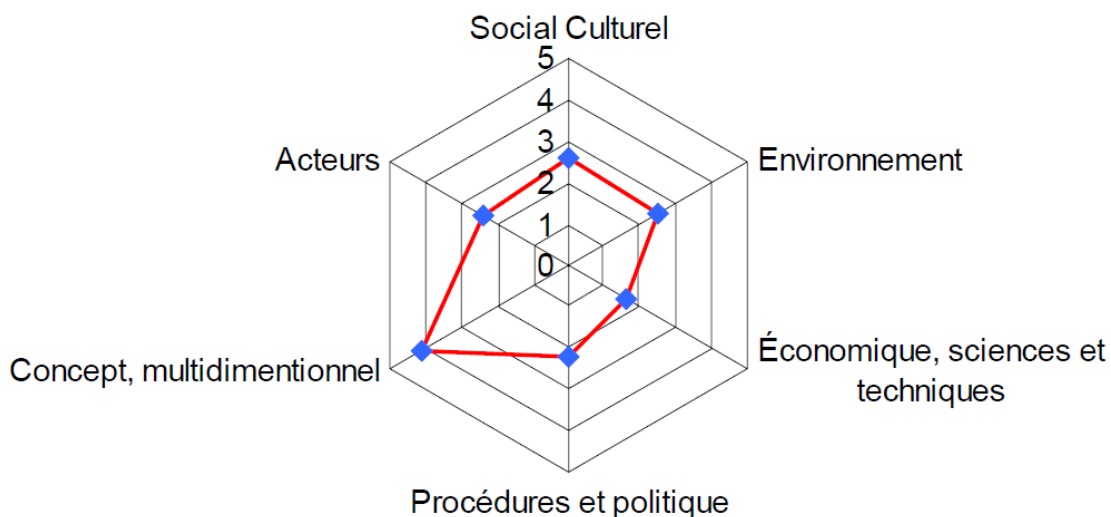


Figure A.12 : Graphique d'évaluation d'une carte cognitive au travers des six axes principaux du DD (Lourdel, 2005¹⁵²)

¹⁵¹ Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

¹⁵² Lourdel, N., 2005. Méthodes pédagogiques et représentation de la compréhension du développement durable : application à la formation des élèves ingénieurs (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00781854v1>

Lourdelle avance en conclusion de ce point qu'une identification d'un profil de chaque participant peut être dressée à partir du graphique d'évaluation et de la complexité mise en avant sur la carte cognitive, et ce dans l'optique d'identifier les lacunes de chaque étudiant ou les préoccupations principales du groupe. Cette évaluation peut également être réalisée de sorte à mettre en perspective les connaissances avant et après une formation, et identifier ainsi la pertinence du programme suivi. Il est également intéressant de comparer l'évaluation par un professeur et l'auto-évaluation d'un étudiant selon ce graphique d'évaluation pour estimer la capacité de ce dernier à estimer ses propres lacunes.

Dans le cas où le temps viendrait à manquer, Lourdelle propose de commenter collectivement l'une ou l'autre carte particulièrement intéressantes (dans le bon ou le mauvais sens) et représentatives des cartes de chacun. Une discussion et la réalisation d'une carte commune en intelligence collective peut également faire office de synthèse et de conclusion à cet exercice d'évaluation.

Annexe 5 : Les outils de formation des professeurs

Mulà et al., 2017¹⁵³ répertorient un ensemble d'initiatives destinées à former le corps enseignant :

- UE4SD Leading Practice: <https://www.iau-hesd.net/documentation/2660-leading-practice-publication-professional-development-university-educators> ;
- GUNi-IAU-AAU project "Promotion of Sustainable Development by Higher Education Institutions in Sub-Saharan Africa": https://aau.org/wp-content/uploads/sites/9/2018/04/promotion_of_sd_by_HEIs_sub_saharan_africa.pdf ;
- HEFCE, Leading Curriculum Change for Sustainability: Strategic Approaches to Quality Enhancement: <http://efsandquality.glos.ac.uk/> ;
- UE4SD Turnaround Leadership for Sustainability in Higher Education: https://www.westernsydney.edu.au/_data/assets/pdf_file/0018/411075/TLSHE_Final_Exec_Summary_HA_12_Nov_12_pdf_version.pdf ;
- Centre for Sustainable Futures Plymouth - Future Fit Framework: <https://www.advance-he.ac.uk/knowledge-hub/future-fit-framework> ;
- UNECE ESD Competence Framework for Educators: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/esd/ESD_Publications/Competences_Publication.pdf ;
- WWF professional development of teacher competences for learning for sustainability : https://www.researchgate.net/publication/293650649_WWF_Professional_Development_Framework_of_Teacher_Compentences_for_Learning_for_Sustainability ;
- UNECE - Competencies for ESD (Education for Sustainable Development) teachers: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/esd/inf.meeting.docs/EGC/CSCT_Handbook_11_01_08.pdf .

L'initiative UE4SD s'est ensuite composée d'un ensemble d'expérimentations pédagogiques dans les universités partenaires. Parmi lesquelles on retrouve :

- Des networking théoriques suivis de discussions en groupe sur la mise en application (MedUnNET) ;

¹⁵³ Mulà, I., Tilbury, D., Ryan, A., Mader, M., Dlouhá, J., Mader, C., Benayas, J., Dlouhý, J., Alba, D., 2017. Catalysing Change in Higher Education for Sustainable Development: A review of professional development initiatives for university educators. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 18, 798–820. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-03-2017-0043>

- L'identification de problèmes sur base de méthodes pédagogiques interactives (ENOAT) ;
- Des processus d'apprentissage en groupe facilités par des médiateurs (ENOAT) ;
- Des travaux de groupe clôturés par une réflexion individuelle critique et une discussion de synthèse (RUCAS) ;
- Des études de performance, missions de collecte de données, projets de recherche, présentations orales et des portfolios (RUCAS) ;
- Un apprentissage basé sur des problèmes avec des discussions de groupe, des jeux de rôle, des semaines de projets, des stages, des visites d'entreprises, etc. (EcoCampus) ;
- La planification d'actions et le développement de compétences en stratégies, en leadership et en management du changement (Green Academy) ;
- Le développement de compétences transversales dans les domaines méthodologiques et cognitifs (CRUE-Sustainability) ;
- L'engagement et l'application de principes déontologiques dans les pratiques professionnelles et personnelles (CRUE-Sustainability) ;
- Des projets de recherche et de développement pédagogiques axés sur l'apprentissage par l'action et intégration de l'EDD dans les pratiques des équipes pédagogiques (LSF) ;
- Des conseils sur-mesure d'application des principes du DD dans la discipline enseignée (LSF) ;
- Des dialogues continus et interactifs entre professeurs basés sur la pensée créative et sur l'auto-apprentissage, le partage de ressources (ISDE) ;
- L'organisation de séminaires basés sur des projets ; et l'étude de la transition d'un apprentissage basé sur l'enseignant à un apprentissage basé sur l'apprenant (Leuphana Semester) ;
- Le développement de la pensée critique par l'apprentissage collaboratif (University of Basque Country) ;
- La stimulation de la créativité par la prospective et la discussion au sujet d'alternatives (University of Basque Country) ;
- La recherche participative et active (ISE) ;
- La promotion de la collaboration, la collégialité, la solidarité, la réflexion, la pensée critique et les valeurs dans le pilotage de l'action (INDUCTION Project) ;
- L'étude des interactions entre pairs dans l'éducation au développement durable (INDUCTION Project) ;
- Des études de cas sur l'importance relative donnée aux fondements théoriques, méthodologiques et sur l'apprentissage rétrospectif de ses propres projets dans les études sur l'éducation au développement durable (BINE) ;
- De la *recherche-action* avec des réflexions systématiques sur les pratiques pédagogiques effectives ; en parallèle à l'implication des enseignants dans le processus de délibération sur le contenu et la méthodologie adoptée (BINE) ;
- L'organisation d'ateliers interactifs sur l'approche globale d'une institution dans l'enseignement du développement durable (University of Zurich) ;
- L'organisation de Webinaires sur des thématiques controversées de l'EDD par des experts (University of Zurich) ;
- Des discussions sur des pratiques de changement institutionnels par des parties prenantes de disciplines variées (University of Zurich).

Annexe 6 : Les barrières à l'innovation

Ávila et al., 2019¹⁵⁴ montrent cependant que c'est à l'encontre des innovations organisationnelles que le plus de barrières se dressent. Les auteurs avancent que les principales barrières à l'innovation dans le cadre du développement durable sont :

- Le manque de planification et de concentration
- L'absence d'un comité de pilotage
- L'absence d'applicabilité et de continuité d'une innovation
- La résistance au changement de comportement
- Le manque d'engagement envers l'innovation
- Le manque de formation et de collaboration
- Le manque de culture de l'innovation et l'existence de pensées conservatrices
- Le manque de recherche et développement
- L'inconscience et l'inquiétude
- L'absence de moyens matériels
- Le manque de soutien administratif
- Le manque de technologie pédagogique appropriée
- Le manque d'intégration d'innovations dans l'enseignement et la recherche
- L'absence de concertation avec les parties prenantes
- L'existence d'obstacles institutionnels
- L'absence de stimulation et d'incitation à l'innovation
- L'absence de pratiques et de politiques définies autour du DD
- Le manque de soutien pour l'introduction de comités de contrôle
- Les restrictions issues de la bureaucratie
- Le manque de connaissances et d'éducation

Auxquels on peut ajouter, selon les témoignages ressourcés :

- La perception du développement durable comme d'un complément et non un aspect internalisé et structurant
- Un manque de leadership et de priorisation du développement durable au sein des organisations de pilotage
- Un manque de valeurs partagées
- Un manque d'amplitude dans la définition et l'utilisation des concepts de DD et d'innovation
- La surcharge des programmes de cours
- Le risque de perte en crédibilité du cursus

Les auteurs avancent qu'en Europe, les principales barrières à l'innovation dans le cadre de l'enseignement du DD sont :

- Le manque de soutien de la direction

¹⁵⁴ Ávila, L.V., Beuron, T.A., Brandli, L.L., Damke, L.I., Pereira, R.S., Klein, L.L., 2019. Barriers to innovation and sustainability in universities: an international comparison. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 20, 805–821. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-02-2019-0067>

- Le manque de recherche et développement
- Le manque de bâtiments et de structures adéquats
- Le manque de comités de pilotage et le manque de sensibilisation et de préoccupation

Les autres barrières restent cependant présentes dans une moindre mesure. Les auteurs perçoivent un réel besoin de prendre en compte ces barrières dans le processus d'innovation dans le cadre du DD et a fortiori de son intégration dans le cursus, et ce surtout en ce qui concerne l'innovation organisationnelle.

Laurett et al., 2019¹⁵⁵ Mettent en avant une décomposition des barrières qui s'opposent à une action, une initiative ou une activité de développement durable ; et qui permet de procéder à une analyse systématique de ces barrières. Une première décomposition des barrières, d'ordre **individuelles** à ce stade, peut être effectuée entre les barrières issues d'un déficit de conscience, de connaissance ou d'information d'une part, et d'autre part les pièges culturels qui obscurcissent la vision et par là endiguent l'action. La figure A.13 montre cette décomposition.

Les auteurs avancent également que de nombreuses barrières à l'échelle **systemique** sont en action, comme décrit aux figures A.14 et A.15. Ces barrières peuvent être décomposées selon qu'elles proviennent d'une résistance interne (figure A.14) ou externe (figure A.15) au système concerné par l'innovation. Les barrières internes au système peuvent être d'ordre structurel, politique, social ou culturel. Quant aux barrières externes, elles peuvent être issues de la gouvernance, du contexte de marché, de problèmes techniques, et du système de valeurs en contradiction.

¹⁵⁵ Laurett, R., do Paço, A., 2019. Sustainability Barriers, in: Leal Filho, W. (Ed.), Encyclopedia of Sustainability in Higher Education. Springer International Publishing, Cham, pp. 1608–1614.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_188

Sustainability barriers	Definition
Deficiencies in consciousness, knowledge, and information	Ignorance about how the world works: There is awareness and concern about the issue of sustainability, but there is little knowledge about it
	Utilizing linear rather than systemic thinking: The need to think systematically to achieve sustainability
	Incoherencies in key premises about how the world works: The need to understand how the world works
	Faulty theories of social stability and social change: Difficulty in visualizing the need for change in the world to achieve sustainable development
	“Infoglut” in the information society: Excessive information on a wide range of issues can also create barriers to relevant issues such as sustainability
	Most people are not listening: There are a number of agents of change concerned with the issue of sustainability. However, most citizens turn to listening to messages from conventional media, and these messages about sustainability tend not to have large audiences; these tend to be mostly people who are already interested in the subject
Cultural traps that obscure vision and forestall action	Creeping environmental problems vs. competing problems: Due to the many different problems that society faces, other problems may be prioritized, rather than environmental ones
	Profound fascination with technology: One of the barriers to sustainable development is to focus on and expect results through the use of technology, regardless of the culture, values, behavior patterns, etc.
	Lack of imagination: Difficulty of using the imagination about how our future will be, a new society, a more sustainable society; in this case, this requires people to be curious and in trying to imagine different scenarios
	Deep psychological investment in the status quo: Difficulty of changing current patterns of consumption and lifestyles
	The siren call of progress: One is taught to want progress, without seeking to be more “advanced,” and thus to do greater things, in an easy manner and using less resources such as energy and material and even in making less money, lowering population growth, and doing things more slowly.
	Relative deprivation and frustration: Related to lifestyle, deprivation of a particular pattern of consumption can lead to frustration
	The injustice of being victimized: People who tend to be afflicted by damage from environmental degradation, tend to feel as victims of this process, and tend to find it difficult to contribute to sustainability actions.

Source: Adapted from Milbrath (1995)

Figure A.13 : Barrières individuelles (Laurett et al., 2019¹⁵⁶)

¹⁵⁶ Laurett, R., do Paço, A., 2019. Sustainability Barriers, in: Leal Filho, W. (Ed.), Encyclopedia of Sustainability in Higher Education. Springer International Publishing, Cham, pp. 1608–1614.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_188

Factor of sustainability barriers	Barriers
Structural dimensions/ internal	Difficulty to scope/prioritize/set goals, lack of strategy
	Lack of goal translation to functional/department basis
	Difficulty to define relevant sustainability performance metrics/perform reporting
	Issues of information filtering/flows/timing to support decision-making
	Lack of function integration/cooperation
	Lack of clear responsibility distribution
	Difficulties related to decision-making processes
	Non-adapted performance measurement and incentive systems
	Locked-in situation related to capital/technology investments
Political dimensions/ internal	Difficulty to elaborate business case, conflict, and difficulty to manage trade-offs
	Low priority on agenda, short-term priority
	Lack of continuity due to changing agenda
	Lack of alignment with other projects
	Power of resisting versus promoting groups
	Lack of financial resources
	Lack of time and human resources
	Lack of local empowerment (department, business unit, subsidiary)
	Lack of R&D/innovative capabilities
Human dimensions/ internal	Lack of awareness
	Lack of interest/commitment
	Lack of involvement and empowerment
	Lack of support from management for employees
	Lack of skills/knowledge/training
	Difficulties linked to learning process
	Fear to lose creativity/flexibility
	Fear of work overload
	Discomfort/uncertainty about topic
	Difficulty to find sustainability ambassadors with necessary set of skills
Cultural dimensions/ internal	Skepticism regarding potential benefits
	Lack of entrepreneurial spirit/room for out-of-the-box thinking
	It is not the company's responsibility
	Sustainability is a distraction
	Language barriers
	Sustainability is "not invented here"
	Sustainability input is constraint/criticism

Figure A.14 : Barrières internes

Factor of sustainability barriers	Barriers
Regulation/ external	Unclear/fuzzy message from regulation
	Multiple/complex/changing regulation
	Low pressure from regulation/control
	Regulation limits room for innovation
Market/external	Unclear/fuzzy message from customers
	Lack of understanding/knowledge among
	Low market demand/willingness to pay
	Lack of influence on customers
	Lack of competitiveness
Technology and tool/external	Dependency on available technology
	High research costs/risks for new technologies
	Lack of framework/tool customization
	Complex/time-consuming/information intensive tools
	Difficulty to make links with other business concerns when using tools
	Lack of industry-specific information/benchmark/reference cases
Value network/ external	Dependency on current infrastructure/value network setting
	Lack of understanding/knowledge among customers
	Lack of commitment
	Lack of trust, reluctance to sharing information/making joint investments
	Current/future locked-in situation or lack of bargaining power against other players
	Difficulty to communicate and exchange data across the value network
	Difficulty to collaborate within/coordinate the value network
	Discrepancy across accounting/contracting practices/incentives
	Risk of scrutiny by stakeholders

Figure A.15 : Barrières externes (Laurett et al., 2019¹⁵⁷)

Selon Vemury, et al., 2018¹⁵⁸, une méthode d'enseignement exclusivement mono-disciplinaire (chaque module de cours s'inscrit dans une discipline précise bien que le cursus puisse aborder

¹⁵⁷ Laurett, R., do Paço, A., 2019. Sustainability Barriers, in: Leal Filho, W. (Ed.), Encyclopedia of Sustainability in Higher Education. Springer International Publishing, Cham, pp. 1608–1614.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-11352-0_188

plusieurs disciplines au total) peut être considérée comme une barrière à l'apprentissage du développement durable car elle ne permet pas de développer de capacité en résolution de systèmes complexes. Nous parlerons alors de *cloisonnement disciplinaire* comme barrière.

Dans un autre registre, la résolution systématique de problèmes dits “bien structurés” ne permettrait pas aux étudiants de se confronter à la complexité et l'urgence des problèmes auxquels ils feront face ainsi qu'à y adresser des solutions adaptées.

Annexe 7 : Les barrières à l'adaptation

Moser et al., 2010¹⁵⁹ s'intéressent à dresser un cadre systématique pour identifier les barrières qui s'opposent à l'*adaptation* dans le cadre du dérèglement climatique. Ces barrières se décomposent aisément en de nombreuses catégories qui permettent de poser un cadre à l'identification systématique des barrières à l'adaptation. Les catégories gagnent à être définies par l'implication de sous-systèmes en interaction : les acteurs, l'objet en interaction avec les acteurs et le contexte accueillant ces interactions.

Selon les auteurs, les phases du processus d'adaptation, auxquelles s'appliquent les barrières, sont :

- La phase de compréhension ;
- La phase de planification ;
- La phase de pilotage.

Les principales barrières qui se posent lors de ces différentes phases et dues aux interactions entre les différents éléments du système sont répertoriées aux figures A.16, A.17 et A.18.

¹⁵⁸ Vemury, C.M., Heidrich, O., Thorpe, N., Crosbie, T., 2018. A holistic approach to delivering sustainable design education in civil engineering. *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19, 197–216. <http://dx.doi.org/10.1108/IJSHE-04-2017-0049>

¹⁵⁹ Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *PNAS*. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>

Phase and process stages: Understanding	Barriers
Detect problem	Existence of a signal Detection (and perception) of a signal Threshold of concern (initial framing as problem) Threshold of response need and feasibility (Initial framing of response)
Gather/use of information	Interest and focus (and consensus, if needed) Availability Accessibility Saliency/relevance Credibility and trust Legitimacy Receptivity to information Willingness and ability to use
(Re)define problem	Threshold of concern (reframing of the problem) Threshold of response need Threshold of response feasibility Level of agreement or consensus, if needed

Figure A.16 : Barrières au processus d'adaptation lors de la phase de compréhension (Moser et al., 2010¹⁶⁰)

Phase and process stages: Planning	Barriers
Develop options	Leadership (authority and skill) in leading process Ability to identify and agree on goals Ability to identify and agree on a range of criteria Ability to develop and agree on a range of options that meet identified goals and criteria Control over process Control over options
Assess options	Availability of data/information to assess options Accessibility/usability of data Availability of methods to assess and compare options Perceived credibility, saliency, and legitimacy of information and methods for option assessment Agreement on assessment approach, if needed Level of agreement on goals, criteria, and options
Select option(s)	Agreement on selecting option(s), if needed Sphere of responsibility/influence/control over option Threshold of concern over potential negative consequences Threshold of perceived option feasibility Clarity of authority and responsibility over selected option

Figure A.17 : Barrières au processus d'adaptation lors de la phase de planification (Moser et al., 2010¹⁶¹)

¹⁶⁰ Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. PNAS. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>

¹⁶¹ Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. PNAS. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>

Phase and process stages: Managing	Barriers
Implement option(s)	<ul style="list-style-type: none"> Threshold of intent Authorization Sufficient resources (fiscal, technical, etc.) Accountability Clarity/specificity of option Legality and procedural feasibility Sufficient momentum to overcome institutional stickiness, path dependency, and behavioral obstacles
Monitor outcomes & environment	<ul style="list-style-type: none"> Existence of a monitoring plan Agreement, if needed, and clarity on monitoring targets and goals Availability and acceptability of established methods and variables Availability of technology Availability and sustainability of economic resources Availability and sustainability of human capital Ability to store, organize, analyze, and retrieve data
Evaluate effectiveness of option	<ul style="list-style-type: none"> Threshold of need and feasibility of evaluation Availability of needed expertise, data, and evaluation methodology Willingness to learn Willingness to revisit previous decisions Legal limitations on reopening prior decisions Social or political feasibility of revisiting previous decisions

Figure A.18 : Barrières au processus d'adaptation lors de la phase de pilotage (Moser et al., 2010¹⁶²)

Les auteurs insistent par ailleurs sur l'importance du Leadership, des Ressources et de la Communication tout au long des trois phases. Ils précisent également que des valeurs partagées et des représentations similaires des objets traités sont des conditions nécessaires au processus d'adaptation.

Annexes de la partie C « Application des résultats »

Annexe 8 : Grille d'analyse (vierge) pour outils d'intégration

¹⁶² Susanne C. Moser, Julia A. Ekstrom, 2010. A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. PNAS. URL <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1007887107>

Catégories	Note	Commentaire	Total
Changement de paradigme			/20
Rôle sociétal de l'Ingénieur			
Impacts et déontologie			
Adéquation de la démarche à la complexité			
Changement en profondeur du cursus			
Complexité de l'intégration			/15
			/20
Complexité du DD et de l'EDD			
Complexité du système d'enseignement			
Pilotage de l'intégration			
Parties Prenantes			/20
Catégories représentatives			
Rôle potentiel			
Pistes d'amélioration			
Coordination et pilotage			
Conception des Artefacts			/15
			/20
Méthodes d'enseignement			
Outils didactiques pour l'apprenant			
Outils didactiques pour l'enseignant			
Barrières à l'intégration			/50

			/20
B. sémantiques			
B. techniques			
B. individuelles			
Pièges Culturels			
B. systémiques internes			
B. systémiques externes			
Cloisonnement disciplinaire			
B. à la compréhension			
B. à la planification			
B. à l'évaluation			
Leviers d'action			/25
			/20
Création de lien entre parties prenantes			
Communication/ coordination/ médiation			
Organisations aux frontières			
Gestion des conflits instrumentaux			
Bonnes pratiques			
TOTAL			/120
			/20

Tableau A.1 : Grille d'analyse d'outils d'intégration