

Quelle(s) formation(s) pour une recherche industrielle ?

What training is needed for industrial research?

Par Eric Schaer¹, Frédéric Demoly², Jean-Claude André¹

¹ LRGP - UMR 7274 CNRS-UL - ENSIC 1, rue Grandville F54000 Nancy, jean-claude.andre@univ-lorraine.fr

² ICB UMR 6303 CNRS – Université Bourgogne Franche-Comté - UTBM, F90010 Belfort

RÉSUMÉ. En examinant les programmes d'études de nombre d'écoles d'ingénieurs françaises, leurs visions globales se traduisent par des catégories éducationnelles orientées vers des apprentissages théoriques, rationnels et déterministes généralistes et orientés vers les cibles applicatives principales. Les liens avec les milieux industriels se développent pour une part importante par le biais de stages qui élargissent la vision un peu fermée que leur procure leur Ecole. Cette situation est issue de l'histoire avec le besoin de la maîtrise des modèles mathématiques pour concevoir des structures, des armes, des ponts, des usines, des procédés de transformation de la matière et de l'énergie, etc. Ce que l'on observe, c'est la diminution des ères technologiques depuis le charbon, l'électricité, l'électronique avec un environnement de plus en plus contraint et des demandes de dispositifs de plus en plus sophistiqués, à durée de vie de plus en plus courte, dans un contexte social changeant. La question posée dans cette réflexion est d'analyser si l'impact des tendances lourdes rapidement évoquées est susceptible de remettre en cause, au moins en partie, les fondamentaux des formations actuelles. Ce que nous montrons, c'est l'importance des concepts de rigueur qui doivent toutefois s'élargir par différentes voies à d'autres domaines en favorisant la créativité, l'imagination, l'agilité pour rapprocher le travail de l'ingénieur de la demande sociale de nouveaux besoins. Pour l'instant, il s'agit pour les auteurs d'une démarche flexible/adaptative qui doit favoriser les modes de création de la part des étudiants, la maîtrise du doute, l'interdisciplinarité et la gestion de la complexité dans le développement des procédés industriels.

ABSTRACT. A look at the curricula of many French engineering schools reveals that their global vision is reflected in educational categories geared towards theoretical, rational and deterministic generalist learning, with a focus on the main application targets. Links with industry are developed in large part through internships, which broaden the somewhat closed vision provided by their school. This situation has its roots in history, with the need to master mathematical models to design structures, weapons, bridges, factories, material and energy transformation processes, and so on. What we are witnessing is the decline of technological eras from coal to electricity to electronics, with an increasingly constrained environment and demands for ever more sophisticated devices, with ever shorter life spans, in a changing social context. The question posed in this reflection is to analyze whether the impact of the major trends we have just mentioned is likely to call into question, at least in part, the fundamentals of current training courses. What we are showing is the importance of rigorous concepts, which must nevertheless be extended in different ways to other fields, promoting creativity, imagination and agility to bring the engineer's work closer to the social demand for new needs. For the time being, the authors see this as a flexible/adaptive approach that should encourage creative modes on the part of students, the mastery of doubt, interdisciplinarity and the management of complexity in the development of industrial processes.

MOTS-CLÉS. invention, innovation, créativité, complexité, interdisciplinarité, heuristique, conservatismes.

KEYWORDS. Invention, Innovation, Creativity, Complexity, Interdisciplinarity, Heuristics, Conservatism.

« Du point de vue de la science moderne, la conception n'est rien, mais du point de vue de l'ingénierie, la conception est tout. Elle représente l'adaptation à dessein de moyens pour atteindre une fin préconçue, l'essence profonde de l'ingénierie » (Layton, 1976).

« Les contradictions donc des jugements, ne m'offensent, ni m'altèrent : elles m'éveillent seulement et m'exercent. Nous fuyons à la correction, il s'y faudrait présenter et produire, notamment quand elle vient par forme de conférence, non de régence. À chaque opposition, on ne regarde pas si elle est juste ; mais, à tort, ou à droit, comment on s'en défera. Au lieu d'y tendre les bras, nous y tendons les griffes » (Montaigne, 2009).

Introduction

En examinant les programmes de nombre d'Ecoles d'ingénieurs, la tendance académique dominante consiste largement à envisager des formations comme celles proposées pour des scientifiques

« unidimensionnels », ce qui pour Dias de Figueiredo (2014) rend l'occurrence combinée des compétences en un seul diplômé d'ingénieur presque impossible. Selon cet auteur, avec les apprentissages déterministes classiques (réponse efficace à des questions techniques), un « ingénieur complet » serait une combinaison de stratège-intégrateur (concepteur), de scientifique-penseur, d'Homme d'affaires-humaniste-négociateur et d'Homme d'action... Cet aspect qualitatif intéressant a été amputé par l'Union Européenne et également par la CTI, la Commission du Titre d'Ingénieur, pour des raisons de standardisation (et puis ça évite de penser et d'être responsable). Ce même auteur (Dias de Figueiredo, 2014) considère que cette situation pourrait trouver son origine dans une négligence sur la non-prise en compte de rôle central de la conception en ingénierie, avec une compréhension limitée des pratiques d'ingénierie comme simple résolution de problèmes... Travaillant dans deux grandes Ecoles d'ingénieurs, avec des programmes disciplinaires particulièrement denses, il est sans doute judicieux de revenir dans un monde changeant sur ce que l'on entend par tête bien faite ou tête bien pleine ! Par conservatisme, on travaille toujours avec un système de reproduction des élites dans lequel on peut capitaliser sur les savoirs, mais aujourd'hui on a besoin de cadres qui savent également naviguer (avec succès) dans l'incertitude ambiante.

Les compétences recherchées par l'entreprise pour une embauche d'un jeune ingénieur sont, en principe, le résultat d'un « habile » mélange de connaissances, d'expériences, d'aptitudes, de personnalités, le tout créant un profil particulier attractif pour l'entreprise. Ce qui ressort de cette phrase, c'est que l'humain est et reste au centre de toute création de valeur, ce qui fait que le recrutement reste un art, une prise de risque. Le « bon choix » est un élément important de la performance des entreprises, un mélange de données concrètes et de perceptions subjectives visant à identifier le meilleur candidat selon une description approfondie de poste préétablie. Pour Levy-Leboyer (2009), l'objectif de l'évaluation qui était de prévoir la réussite à un poste donné à partir des informations concernant les performances passées est devenu l'évaluation d'un candidat sur sa capacité d'adaptation dans un futur inconnu et son aptitude à acquérir rapidement des compétences nouvelles, parce que, dans le même temps, l'organisation, la production et son environnement auront très vite évolué. Ce cadre étant rappelé, comment choisir le bon candidat s'il ne connaît que des formations techniques mathématisées s'appuyant sur la science connue ? Sans parler de ChatGPT et autres IA, quelles richesses peut-il apporter à l'entreprise pour sa performance ? Quelles sont les compétences résilientes reconnues chez le candidat à l'embauche ? L'image de l'Ecole, le talent et l'intelligence virtuose du candidat ne risquent-ils pas d'être confondus avec la compétence recherchée ?

De fait, cette réflexion n'est pas neuve : « L'idée centrale est que le garçon va à l'université pour se former, [encore] se former et se remplir l'esprit d'un tas de connaissances [disjointes]. Moi, je dis sans la moindre hésitation que pour réussir dans la vie, la formation intellectuelle vient en second, voire en troisième. Sans aucun doute, ce qui compte d'abord, c'est le caractère, puis le bon sens, enfin et enfin seulement la formation intellectuelle, à l'université, on insiste uniquement sur la formation intellectuelle » (Taylor, 1909). D'ailleurs Karlgaard (2010) nous rappelle qu'« au-delà de cinq années d'expérience, les performances académiques acquises n'ont plus la moindre valeur ; et le talent n'apparaît en rien dans la perspective de ce que l'on est susceptible de faire, mais bien dans ce que l'on a déjà fait »...

Si l'on choisit une Ecole relativement à d'autres, c'est de manière évidente parce qu'il nous est possible de faire un choix qui repose pour l'essentiel sur l'image que le candidat se fait de l'organisation de formation professionnelle. Il suffit de regarder les programmes pour se rendre compte des tensions qui existent entre enjeux de formation scientifique (apprentissage rapide d'origine scientifique) et enjeux créatifs (problem solving) dans ces Ecoles. Parce que peuplées d'enseignants chercheurs disciplinaires, parce que ce n'est pas coûteux en temps, en matériels, etc., les enjeux de formation disciplinaire pèsent sur les enjeux créatifs, malgré des discours répétés sur les notions de convergences interdisciplinaires (innovation) qui s'intensifient. Par ailleurs, selon Cina (2021), « les normes de standardisation, alignées aux objectifs économiques des organisations, sont de plus en plus présentes et attaquent l'esprit créatif des individus au travail ». Cette notion d'image formatée pour être attractive permet sans doute d'expliquer la création et la manière dont l'imaginaire (l'image d'une

Ecole) émerge, se tarit ou se développe (Chemin-Bouzir, 2019)... Visiblement, les jeunes ont plus de tropisme pour le numérique que pour la mécanique automobile ! C'est pour faire simple, jouer sur la perte d'image (telle qu'on peut la ressentir) de haut savoir faire des Arts et Métiers pour tenter, par mimétisme pédagogique, à faire ressembler cet ensemble d'Ecoles à Polytechnique ! Mais, pour être pionnier et entreprenant, peut-être faut-il accepter de valoriser l'artisan vertueux et de ne pas toujours être en col blanc ? Pour rappel, Eugene Ferguson (1992) déclara qu'« une formation à l'ingénierie qui ignorerait le riche héritage de l'apprentissage non verbal produirait des diplômés dangereusement ignorants de la myriade de subtiles façons à travers lesquelles le monde réel diffère du monde mathématique enseigné par leurs professeurs »... Cette vision est le résultat de luttes perdues qui ont opposé depuis le XIX^{ème} siècle, les ingénieurs civils aux polytechniciens, accusés de privilégier les savoirs abstraits et le raisonnement mathématico-déductif au détriment des connaissances utiles aux développements industriels.

Le débat n'est certes pas nouveau et ces quelques pages ne vont pas le clore ! Déjà en 1901, Fayol écrivait : « On est d'accord sur la nécessité d'allier la théorie à la pratique dans l'éducation des ingénieurs ; mais c'est sur la question de mesure qu'on diffère. Les uns songent sans cesse à surcharger les programmes d'admission et les cours professés dans les grandes écoles industrielles ; d'autres pensent qu'on a déjà dépassé la limite de l'enseignement théorique nécessaire et qu'on fait perdre inutilement à l'élite de notre jeunesse un an ou deux qui seraient mieux employés dans la vie active. Je pense comme ces derniers ». Dans l'imaginaire de quelques élèves-ingénieurs interrogés par les auteurs, la formation est plutôt présentée comme relevant de la pensée calculatoire, modélisatrice et formalisatrice. « Il repose sur un travail de simplification du réel pour construire une représentation plausible et opératoire du problème, reliée au monde par des opérations de mesure qui fournissent la base au calcul des solutions » (Vinck, 2014).

Dans ce contexte, Rosalind Williams (2002) déclarait par ailleurs que l'ingénierie comme profession avait besoin de se revisiter parce que les composantes qui ont fait de l'ingénierie un support essentiel au développement sociotechnique sont en train de se séparer. D'une part, depuis peu, des réalisations majeures en ingénierie n'auraient pas été initiées par des ingénieurs, mais par d'autres personnes issues plutôt de domaines scientifiques. Le rôle des ingénieurs se limiterait-il à répondre quantitativement à des questions « simples », telles que celles enseignées durant leur scolarité ? D'autre part, le besoin de formations sur des approches interdisciplinaires n'est pas suffisamment pris en compte dans les programmes (vieux problème de l'évaluation).

1. Hiatus éducationnels

Participer par exemple, dans un cadre de développement durable, à certaines ouvertures ne couvrira pas tout le champ de ces remises en cause profondes des qualités recherchées chez un ingénieur (accélérées depuis peu par le redéploiement de l'intelligence artificielle ; cf. par exemple Ahmed, Wahed et Thompson, 2023). En profitant de l'exercice, en quelques séances, il serait cependant possible de faire constater aux étudiants les limites de leurs formations, nécessitant de mieux relier le vrai monde à l'aspect « décharné » des programmes actuels (malgré les stages). Mais, en dehors de la réforme « Schwartz » à l'Ecole des Mines de Nancy qu'un des auteurs a bien connu, il est rare qu'une direction d'une Ecole de haut niveau se remette en cause ! Même si l'information circule plus rapidement et largement que jamais, l'acquisition de compétences transverses et plus encore connectives devraient être valorisées aujourd'hui, car associées à de précieuses capacités d'empathie et d'innovation en situation complexe (Christensen et al, 2013). Pour aborder ces situations, marquées par de nombreuses interdépendances, l'hybridation entre disciplines est requise. C'est, indépendamment de la matière traitée une voie qui permet des ouvertures sur la nature ou, plus techniquement sur la vie de la cité. Il s'agit bien de permettre un « lâcher-prise » pour que les étudiants (et pour une part, leurs formateurs) sortent de leurs « zones de confort » pour trouver des pistes de solution originales pour leurs domaines grâce à l'exploration d'un monde « de terrain » qui, dans leur Ecole, leur est de plus en plus étranger (cf. Pinker, 2011).

Or, le corps des formateurs implique pour une très grande part un lien avec la science, structurée en recherches de haut niveau disciplinaire. Soit il existe un hiatus qui s'élargit avec le temps entre recherche et formation, soit l'enseignant met en pratique éducative les connaissances spécialisées issues de sa quête scientifique (ce qui lui permettra de gravir les échelons dans la hiérarchie universitaire et de disposer d'un meilleur salaire). Ce contexte n'incite pas facilement à satisfaire le besoin d'une formation dynamisée ouverte sur le besoin d'un progrès responsable pour la société... Sur ce thème, Douglas Lewin (1979) affirmait que, pour éviter la dégénérescence de la recherche en ingénierie en recherche scientifique conventionnelle, les ingénieurs devraient garder fermement à l'esprit le but et l'application de l'ingénierie et, par conséquent, la recherche « devrait dériver de la fonction de conception elle-même » !

Grégory (1996), écrivait « La méthode scientifique est un modèle de comportement de résolution de problèmes employé pour découvrir la nature de ce qui existe, alors que la méthode de conception est un modèle de comportement employé pour inventer des choses de valeur qui n'existent pas encore. La science est analytique ; la conception est constructive ». Il est fait une différence entre l'approfondissement de connaissances scientifiques et les principes de conception, richesse du comportement de l'ingénieur qui, s'appuyant sur la science et ses pratiques rationnelles peut résoudre des problèmes complexes sous différentes formes, tout en sachant gérer des compromis non scientifiques. C'est en ce sens que Grégory peut écrire que la conception est constructive. « Pour les ingénieurs, contrairement aux scientifiques, le savoir n'est ni une fin en soi ni l'objectif central de leur métier. C'est plutôt... un moyen en vue d'une fin utilitaire... » (Vincenti, 1990). Alors, pour les ingénieurs amenés à concevoir, ces derniers doivent valoriser un esprit de synthèse, plutôt analytique. « Ils enracinent leur pratique dans des visions holistiques, contextuelles et intégrées du monde, plutôt que dans des visions partielles, telles qu'elles sont recherchées en science. En ce sens, les concepteurs sont stratèges : ils sont mus par une vision de la totalité, un rêve d'évolution où le tout génère les parties et les parties génèrent le tout » (Dias de Figueiredo, 2014).

Enfin, une ouverture revenant sur les formations permettrait des expérimentations, certes en nombre raisonnable, sur l'intérêt d'activités économiques profitables ancrées dans la notion de liens (cf. GWI, 2023 ; Industrial Commons, 2023). Il s'agit, par exemple de réseaux intégrés de structures de productions de pointe ayant, en plus de leur activité principale, pour mission le réseautage, la réduction des productions de déchets, la gestion intelligente des ressources communes, mais également un « espace de création » pour la communauté des acteurs. Dans ce type d'opérations moins formatées, les étudiants auraient (enfin) la possibilité de privilégier le raisonnement abductif (raisonnement consistant à inférer des causes probables à un fait observé) sur le raisonnement déductif utilisé normalement par les scientifiques « durs » ; ils doivent pouvoir faire face aux raisonnements par analogie et aux métaphores, en progressant de façon dialectique, en étant agiles pour « voir que » et « voir comme » pour faire émerger (ou contourner) des verrous à faire sauter (flexibilité). Cette pensée de conception (design thinking), faisant souvent appel à l'interdisciplinarité (et à son organisation) est davantage appropriée que l'approche scientifique d'approfondissement pour se confronter aux problèmes d'ingénierie, de plus en plus complexes aujourd'hui.

Avec le développement d'un monde de plus en plus complexe, soumis à des contraintes nouvelles (réchauffement climatique, réserves, migrations, instabilités politiques, etc.), la conception d'un système industriel nouveau peut se développer à partir d'un puzzle d'exigences incomplètes et incertaines qui, avec la rapidité des évolutions de notre environnement, change parfois plus vite que l'évolution de nos modes de penser et d'agir à cause d'innovations radicales, tandis que coexistent des activités de conception et d'implémentation. L'incertitude liée à des systèmes mal conditionnés se trouve dans de « vilains problèmes » (Rittel et Webber, 1973) « de plus en plus nombreux, dans lesquels l'interdépendance entre facteurs technologiques, sociaux et organisationnels requiert des stratégies de conception où la formulation et la solution se développent en parallèle, et se renforcent mutuellement » (Dias de Figueiredo, 2014).

Pour revenir à des aspects de durabilité, en accord avec l'OCDE (OECD, 2023), ne pourrait-on pas réfléchir à des formations permettant de satisfaire les différents accords étatiques liés à l'environnement, tout en sachant que le déploiement des technologies existantes ne permettra pas d'atteindre les objectifs promis par les politiques. « Près de la moitié des réductions en 2050 devront provenir de technologies qui ne sont actuellement qu'en phase de démonstration ou de prototype ». Ce rapport important suggère plusieurs actions résumées ci-après :

- Rééquilibrage des politiques scientifiques, technologiques, d'innovation et industrielles, en mettant davantage l'accent sur les technologies qui ne sont pas encore matures ;
- Soutien à la recherche pour favoriser l'innovation à faible émission de carbone et aux politiques climatiques ;
- Soutien à la R-D des entreprises principalement direct plutôt qu'horizontal (subventions) ;
- Réduction des obstacles pour aider les entreprises à haut risque à collecter des fonds ;
- Amélioration de la R-D collaborative, entre entreprises, entre entreprises et établissements publics de recherche et entre pays ;
- Suppression des subventions aux combustibles fossiles et tarification du carbone.

N'en doutons pas, il y a de manière évidente une vraie place pour des ingénieurs tels qu'ils étaient dans leur activités quotidiennes au siècle dernier dans ce décor positif plutôt qu'anxiogène de notre futur ! Dans cette perspective, un processus névralgique doit exister dans l'articulation de deux régimes nécessaires à tout processus d'innovation : le régime de divergence (idées, cf. André, 2023) et le régime de convergence. Pour Carrier et Gélinas (2011), la créativité consiste à capter des idées de valeur, alors que l'innovation vise à capturer la valeur des idées... Cet enjeu d'articulation entre deux régimes différents s'intéresse aux liens entre créativité, preuve de concept et démonstrateur industriel. Cette interdépendance n'opère pas dans une transition simple, linéaire et potentiellement improbable, mais bien dans un « bricolage savant » entre des logiques différentes. « Le processus d'innovation prend en compte la divergence et la convergence sans les articuler de manière purement séquentielle, car la sélection, étape clef de la transition, se joue de manière dynamique » (Parmentier, Paris et Gandia, 2021). Sur l'exemple de la durabilité, il y a donc de quoi expérimenter !

Avec plusieurs centaines d'Ecoles d'ingénieurs en France et avec quelques dizaines de milliers d'étudiants formés (Studyrama, 2021), cette présentation très générale est profondément réductrice : Tout les..., ne sont pas des... ! Il existe naturellement une polydispersité (et c'est bien). Un ingénieur n'est normalement pas une personne formatée, juste associée à une formation scientifique tout en maîtrisant une « règle du jeu » (savoir-faire), mais quelqu'un qui doit cultiver d'autres valeurs de savoir être, tout aussi importantes pour une société en doute.

2. Evolutions du métier d'ingénieur

Pour rappel historique Tredgold écrivait déjà en 1828 cette phrase sur le travail des ingénieurs : « L'art d'orienter les ressources de la nature pour l'usage et la commodité de l'Homme ». Le paragraphe précédent a élargi ce principe de base et proposé que des changements soient opérés. Les auteurs sont plus ou moins partis d'approches historiques et évolutionnaires des formations d'ingénieurs orientées vers la réalisation centrée sur des fondements robustes (mécanique, mécatronique, etc.). Des ouvertures interdisciplinaires ont été signalées pour permettre des évolutions susceptibles de mieux satisfaire les besoins nouveaux de la société. En dehors de la production *stricto-sensu*, des ingénieurs peuvent avoir de nombreux autres rôles dans les entreprises et dans la société. La plupart exploitent, avec des aspects rationnels, des connaissances codifiées, voire formatées qui correspondent à une activité d'expertise, plus ou moins approfondie. Mais que devient cette formation quand on travaille sur des objets complexes, sur des nouveautés ou à l'intérieur d'une mission ? Ces co-cibles peuvent changer les considérations présentées dans cette partie 1.

« Nous n'arrivons pas à comprendre pourquoi nous n'y arrivons plus. Tous les problèmes n'ont qu'une cause, mais qui passe inaperçue : nous avons vécu pendant au moins trois cents ans de fruits qui ne demandaient qu'à être cueillis [...]. Or, depuis quarante ans, ces fruits ont commencé à se faire rares, et nous avons fait comme s'ils étaient encore là. Nous n'avons pas voulu reconnaître que nous avons atteint un plateau technologique et que l'arbre était bien plus dépouillé que nous voulions l'admettre » (Cowen, 2011). On peut alors comprendre la stabilité des modes de production linéaires et profitables durant cette période avec des formations qui le furent tout autant. Il y a donc, d'une part, diminution de la « réserve » ou de la difficulté pour l'atteindre pendant que d'autre part, le monde capitaliste soutient un « toujours plus » d'innovations technologiques. Cette situation où l'image dynamique de l'entreprise est importante permet de renforcer, en principe, les liens entre activité de production et recherche technoscientifique (pour autant qu'elle ait été correctement anticipée, ne serait-ce que par la formation).

En effet, « toute organisation est un système immunitaire dont le but, comme tout organisme, est de préserver un certain *statu quo*. Mais, pour les décideurs, la valeur adaptative du changement est devenue supérieure à celle de la stabilité » (Blanquart, Malmaison et Soulier, 2006). Dans les faits, il existe dans nombre d'entreprises un certain attentisme, au mieux du suivisme avec du retard (CEFIC, 2014). Par exemple, un des arguments serait selon Grabowski (2011) que les dépenses de R&D dans le domaine spécialisé du médicament se développent de manière sensiblement exponentielle, alors que le nombre de mises sur le marché augmentent peu. Il y a toujours des situations paradoxales, mais, même si c'est plus difficile, le bon choix pour demain est nécessairement orienté vers certaines formes de maîtrise de la complexité. Et, pour atteindre un tel objectif, il faut opérer des ruptures éducationnelles majeures, comme sortir du causalisme permanent.

Aujourd'hui, la conception d'une production peut se développer à partir d'expériences de laboratoire (par exemple, une synthèse chimique) et la question posée à l'ingénieur est d'être en capacité de sortir du « bécher » pour définir les conditions optimales de production industrielle (tenant compte d'aspects reliés au génie des procédés, mais à d'autres éléments comme le coût, l'approvisionnement, l'hygiène et la sécurité, l'environnement, la formation des opérateurs, la désirabilité du produit, etc.). Autre exemple imposant des latéralisations, celui de la prévention des risques professionnels où l'ingénieur doit participer au progrès technologique avec des modes de prévention en avance sur une future réglementation (sans parler d'éthique). Dans ce dernier cas, on ajoute à de la technique des fondements idéologiques largement multifactoriels : développer et promouvoir les moyens et outils à mettre en œuvre pour maîtriser les risques professionnels (Jeantet et Thiebauld, 2017).

Dans ces cas où la complexité règne, le concepteur dispose d'un puzzle d'exigences incomplètes, parfois paradoxales, qui ne cessent de changer tandis que coexistent les activités de conception et d'implémentation. Comme rappelé dans la partie 1, l'incertitude se trouve dans les « vilains problèmes » (Rittel & Webber, 1973) de plus en plus nombreux. L'importance de la conception comme dimension centrale de l'ingénierie justifie le fait d'identifier les principaux traits distinctifs des ingénieurs quand ils agissent comme concepteurs. Les concepteurs valorisent avant tout la synthèse généralement par des approches interdisciplinaires, bien davantage que l'analyse, et enracinent leur pratique dans des visions holistiques, contextuelles et intégrées du monde, nécessitant des descriptions rationnelles et déterministes pour être exploitées industriellement : la nature est complexe, mais sa transcription doit être déterministe ! (le vieux problème de la quadrature du cercle !). En ce sens, les concepteurs sont des réducteurs de la « vraie » connaissance et par conséquent décideurs dans un « certain incertain », donc stratèges (avec les risques associés) : « ils sont mus par une vision de la totalité, un rêve d'évolution où le tout génère les parties et les parties génèrent le tout » (Dias de Figueiredo, 2014).

La difficulté de ceux qui sont confrontés à des problèmes complexes et non précisément définis, c'est qu'ils doivent se rapprocher de façon exploratoire des conditions réelles industrielles, en tolérant l'ambiguïté, l'exploration de l'alternative et du compromis, la pratique de l'improvisation, conduisant à

la prise de décision en situation de connaissances incomplètes. Par ailleurs, aidé de l'intuition, de l'expérience, très souvent, le travail s'appuie sur du travail en équipe et de création conjointe (Cross, 2007 ; Figueiredo et Cunha, 2007 ; Adams et al, 2011). « Ils privilégient le raisonnement abductif sur le raisonnement déductif ; ils font place à l'analogie et à la métaphore et ils aiment progresser de façon dialectique, se mouvant entre « voir que » et « voir comme » » (Wittgenstein, 1953). Pour atteindre des objectifs de conception en situation de complexité, il paraît nécessaire de développer des méthodes appropriées qui sortent des apprentissages disciplinaires traditionnels.

« Un monde, considéré pendant longtemps comme ordonné, cède la place au « fouillis » d'une réalité où phénomènes naturels, techniques et culturels sont indissociablement mêlés. Les objets des sciences de la nature et des sciences humaines et sociales semblent alors, vus de l'extérieur, se confondre et imposer la coproduction de connaissances dans un monde de plus en plus complexe et ce, avec des impératifs temporels de plus en plus courts » (Schaer et André, 2020). Par exemple, la nature dispose d'un large éventail de stratégies de protection biologique qui font preuve de résilience face à divers impacts. Ces stratégies offrent également une certaine flexibilité qui contribue aux mouvements du corps et à la locomotion (insectes, mammifères, crustacés, etc.). Ces entités biologiques sont souvent complexes et difficiles à reproduire avec les technologies de fabrication conventionnelles parce qu'il est difficile d'imiter les architectures hiérarchiques des matériaux biologiques (Yang et al, 2018). Si ceci est vrai au stade du laboratoire, cela l'est encore plus dans une optique industrielle. Il convient, en effet, d'associer des disciplines disjointes pour réaliser des « clones artificiels » disposant de propriétés nouvelles au stade industriel : protection efficace, une certaine flexibilité et des propriétés de tolérance aux dommages permettant de développer par exemple des armures bio-inspirées solides, résistantes et légères, etc. Cet exemple montre qu'il est possible d'envisager dans cet espace de complexité des innovations, mais elles ne reposent plus sur des formes de pensée et d'action classiques en ingénierie. En revanche, dans un autre cadre, avec un engagement comme celui de prévention des risques professionnels, c'est à la fin d'une conception (quelle que soit la méthodologie utilisée) que l'on sait que l'on a réussi dans son projet.

Cela signifie, selon Dias de Figueiredo (2014), que le rôle le plus saillant de l'ingénierie aujourd'hui n'est pas uniquement de résoudre des problèmes technologiques, « mais de les clarifier et de les formuler au sein des contextes, requérant des visions englobantes, une conscience sociale ainsi qu'une pensée projective. La science est essentielle pour permettre aux ingénieurs de travailler sur différentes parties d'un problème, mais ce sont les approches englobantes de la conception qui les amènent à voir le tout. Plus le monde devient socialement et technologiquement complexe et interdépendant, plus il dépend de la capacité des ingénieurs à agir en concepteurs de systèmes sociotechniques complets ». Or, pour revenir à l'enseignement universitaire, il serait très utile qu'une réflexion ne prenant en compte que les besoins en termes de formation soit menée (en interne et/ou en externe et sans tenir compte de l'existence d'un corps professoral qui a ses propres règles) en s'appuyant sur ce futur qui est ici rapidement dessiné.

Cette cible étant définie, se pose la question sur « comment atteindre l'objectif ou plutôt les objectifs ». Les enseignants-chercheurs développent leurs talents dans des unités de recherche où c'est plutôt l'approche disciplinaire qui est valorisée (évaluation par les pairs et le Comité National). Cela signifie l'existence possible de hiatus entre création de connaissances généralement disciplinaires et leur transfert plus holistique (cf. §1) ou le contraire... Ceci est vrai pour le corps professoral, cela l'est aussi pour l'image d'une Ecole qui tire son origine d'excellence du passé, de sa légitimation par la Commission du Titre d'Ingénieurs peu orientée vers les révolutions à opérer. Tant qu'on continue à travailler sur des incréments associés à des installations coûteuses, les méthodologies présentes des sciences pour l'ingénieur garderont toute leur pertinence ; cela sera moins vrai quand l'ingénieur aura besoin de plus d'agilité, d'une approche globale pour inventer. Mais, comme cela a été rappelé, quel dirigeant d'une Ecole aura le courage d'opérer une transformation (validée par un conseil d'administration disposant de la même culture conservatrice), sorte de gastrulation pédagogique, réelle rupture éducative.

Ce contexte, soulève donc des questionnements nouveaux ou fortement renouvelés. Il paraît utile de tenter de réfléchir dans cette perspective à la notion de déterminisme univoque en sciences déductives qui allait de la compréhension qu'on avait de la nature vers la société, et de prendre ainsi des distances vis à vis d'approches trop réductionnistes qui ont pourtant fait leur preuve dans de très multiples contextes historiques de leur perversion (ne serait-ce que pour résoudre tardivement des problèmes environnementaux). Ce faisant, la non prise en compte de la complexité a contribué à creuser une disjonction entre la nature et la société d'une part et la culture scientifique et technologique d'autre part, rupture dont on commence à ressentir aujourd'hui quelques effets critiques, mettant en cause des procédés et des innovations. Dans ce nouveau contexte social-historique et épistémique, il paraît utile de savoir comment nourrir par l'ouverture interdisciplinaire (mais sans doute pas uniquement) de nouvelles relations entre les sciences de la nature et les attentes de la société ? Il nous faut donner tort à Paul Virilio (2010) quand il a écrit : « Nous sommes sortis de l'accélération de l'histoire pour entrer dans la sphère de l'accélération du réel »...

3. Quelle(s) formations envisager pour une recherche industrielle ?

« Les ingénieurs haïssent la complexité. Je hais les propriétés émergentes. Je ne veux pas que l'avion que je vais prendre demain ait quelque propriété émergente en vol » (Drew, 2010).

Avec le développement du concept d'industrie 4.0, les technologies de fabrication, les matières et les matériaux deviennent un sujet d'intérêt pour les scientifiques, les ingénieurs et les entreprises engagées dans le nouveau. Il en résulte encore un « assortiment » amplifié de procédés efficaces, de matières et de matériaux, jusqu'à une certaine personnalisation. Ce foisonnement mondialisé pose de nouveaux défis qui commencent avec l'émergence d'idées. Ensuite, selon Placzek (2023), se jouent d'autres activités comme un développement de plus en plus rapide de l'industrie et des modes de production et des organisations de travail. L'efficacité, la flexibilité et la rapidité de production sur des opérations de plus en plus complexes, se traduisent par une compétitivité accrue et une réduction des coûts de production. En dehors des procédés et méthodes issues de la science, les opérations sur de grands ensembles de données et l'informatique en nuage deviennent nécessaires, et l'internet industriel des objets gagne en importance (sans oublier la cybersécurité).

A titre d'exemple, le concept de matériaux dits intelligents devient réalité, ces derniers se retrouvant de plus en plus dans les objets manufacturés ou comme éléments des systèmes de production (cf. l'impression 4D - Demoly et André, 2022). Ce qui peut être noté avec ces matériaux et leurs mises en forme, c'est qu'ils autorisent des applications impensées il y a une, voire deux décades. Il est alors possible d'envisager des solutions nouvelles, jusqu'alors inaccessibles. Pour ce faire, il est alors nécessaire de développer des concepts et des hypothèses d'action et de recherche dans des conditions de laboratoire (Preuves de Concept ou POC) et sur des objets réels de systèmes innovants basés sur l'utilisation de ces matériaux dits intelligents. Mais, si l'on examine cette première étape, on constate l'existence d'interdépendances entre éléments (gestion de la complexité), mais, dans un second temps, la modélisation des moyens technologiques dans lesquels les matériaux intelligents sont inclus (ou produits) est également une tâche complexe en raison des phénomènes qui s'y produisent et qui ne sont pas toujours maîtrisés (ni parfois envisagés). Complexité + complexité + pression temporelle à partir d'une idée originale, voilà une opération sous contrainte à mener !

Or, cette conception ne se fait pas qu'avec des méthodes déductives, telles qu'on les enseigne encore dans les Ecoles d'Ingénieurs (André, 2023), elle se met en mouvement avec des modes nouveaux d'interactions entre disciplines, métiers, etc. Si tout est complexe, pour un développement industriel, il faut cependant réduire cette complexité, pour qu'il soit possible d'envisager une production selon des procédures robustes. La réduction doit maintenir une description validée comme acceptable, si ce n'est satisfaisante d'un dispositif donné sous la forme d'un modèle mathématique, au stade de la conception, condition de base de son bon fonctionnement (transition du complexe au causal). Le développement de modèles mathématiques et d'algorithmes pour l'analyse et la

détermination de la robustesse technique des nouveaux procédés est donc un élément important qui devrait faire l'objet d'une recherche scientifique originale plus ample. Ainsi, et on l'aura compris, le champ des possibles technologique est immense, avec des durées d'usage de plus en plus courtes, des complexités de plus en plus grandes, et, dans ce cadre, l'anticipation est nécessaire... mais sur quoi anticiper ? Avec quelle « bonne » méthodologie ? Comment maintenir la confiance entre innovations technologiques et corps social ? Comment maintenir une nécessaire confiance avec la société, par exemple en clarifiant en amont la distinction entre risque et incertitude ?

3.1. Science et/ou technologie ?

« Quand on se pose la question de savoir à quoi sert la science, la première réponse qui vient à l'esprit consiste à évoquer sa fonction utilitaire parce qu'on associe très spontanément la science aux prolongements pratiques que lui donne la technique. Cette « connaturalité » supposée entre science et technique est pourtant démentie par l'histoire qui montre qu'elles ont eu très longtemps des destins séparés » (Decormeille, 2014). Schmidt (2008) fait dans ces deux domaines la distinction entre (a) les choses/objets (ontologie), (b) les connaissances/théories (épistémologie), (c) les méthodes/pratiques (méthodologie), la philosophie des sciences fournit un schéma de classification et d'élucidation qui doit être complété par (d) la perception des problèmes et de leur résolution. Ce cadre philosophique de l'interdisciplinarité est illustré selon cet auteur, par un programme de recherche sur la théorie de la complexité et la théorie du chaos.

Ce qu'écrivent Funtowicz et Ravetz (2020 ; 2020a), c'est que l'implication de la « vraie » science (celle de la nature) nécessite des faits qui sont « certains » et peuvent être exprimés par des chiffres précis, et où les valeurs, les enjeux et les décisions sont considérés comme extérieurs à l'effort scientifique. Entre certitude pour la science d'une part, et l'incertain et la complexité pour la technique d'autre part, que voilà une « belle » réduction ! Pour la composante innovation présentée rapidement en introduction, quatre caractéristiques déstabilisantes du mantra « faits incertains, valeurs contestées, enjeux élevés et décisions urgentes » sont à considérer, ce qui implique de nouvelles formes de pratiques scientifiques, conçues pour relever ces défis. Pour enfoncer le clou, nous sommes entrés dans ce que Funtowicz et Ravetz (2020 appellent une ère « post-normale » parce que, hors innovation, la science et la technologie devront résoudre les questions liées aux écosystèmes et au réchauffement climatique, traiter des objectifs durables non atteints, aux hyper-objets (Morton, 2013 ; Citton, 2016), des inégalités socio-économiques croissantes, de l'affaiblissement démocratique et du renforcement de son corollaire, etc.

Dans les faits, « la vision réductionniste et analytique du monde, qui divise les systèmes en éléments de plus en plus petits, étudiés par des spécialistes de plus en plus ésotériques, est remplacée par une approche systémique, synthétique et humaniste » (Funtowicz et Ravetz, 2020). Il y a donc débat entre les anciennes dichotomies entre les faits et les valeurs, entre la connaissance et l'ignorance. Les systèmes naturels comme les artefacts et leurs productions sont de plus en plus reconnus comme dynamiques et complexes. « Ceux qui impliquent des interactions avec l'humanité sont « émergents », incluant des propriétés de réflexion et de contradiction. La science [comme la technologie] adaptée à cette nouvelle condition sera fondée sur les hypothèses de l'imprévisibilité, d'un contrôle incomplet et d'une pluralité de perspectives légitimes... » (Funtowicz et Ravetz, (2020).

Pour Kuhn (1983), la science « normale » progresse entre ses révolutions conceptuelles. Alors, les incertitudes sont gérées automatiquement, les valeurs ne sont pas exprimées et les problèmes fondamentaux sont inconnus. Cette mise en conformité est définie par Kuhn (1983), sur la base d'un paradigme : « des découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions ». Pour Callon et Lacoste (2011), « le métier de l'ingénieur, c'est de mobiliser les connaissances techniques dont il dispose pour imaginer des innovations qui représentent un compromis acceptable par toutes les parties prenantes. La perfection technique est le poison de l'économie ! Il faut être prêt à bricoler pour satisfaire le plus grand nombre ». A la lecture de ces phrases, la maîtrise des problèmes inverses dans les aspects de

morphogénèse dynamique n'est pas atteinte (en gardant à l'esprit l'exemple de l'impression 4D – cf. Demoly et André, 2022). Il n'y a donc pas encore de solution générale et réaliste aujourd'hui à offrir ! Ce qui est montré, c'est qu'il faut sans doute pour avancer trouver un compromis entre des systèmes parfaitement causalistes « simples et directement rationnels » et une vision plus globale de type morphogénétique traitant des systèmes complexes... C'est en grande partie vers ces situations difficiles que l'on devrait se diriger.

C'est bien sur ces bases que H.A. Simon (1996) a introduit les fondements des « sciences de l'artificiel » qui respectent tous les éléments de la rationalité mais qui acceptent que des solutions « satisficing » soient proposées aux décideurs. Pour Avenier (2019), le but des sciences de l'artificiel est de fournir un cadre épistémique adapté de représentation et de compréhension des phénomènes dans lesquels s'incarnent des intentions humaines et des régulations perçues comme naturelles (les sciences de la nature qui concourent à son développement). « L'expression « sciences de l'artificiel » est donc générique pour désigner un archétype de science fournissant un cadre épistémique de référence pour les disciplines scientifiques qui étudient des artefacts » (Avenier, 2019). En se rapprochant des pratiques, en introduisant l'idée d'un possible « non-absolu », cet archétype est différent de celui des sciences de la nature « classiques ». L'encadré 1, issu de Simon (2016), rassemble les bases principales de son livre.

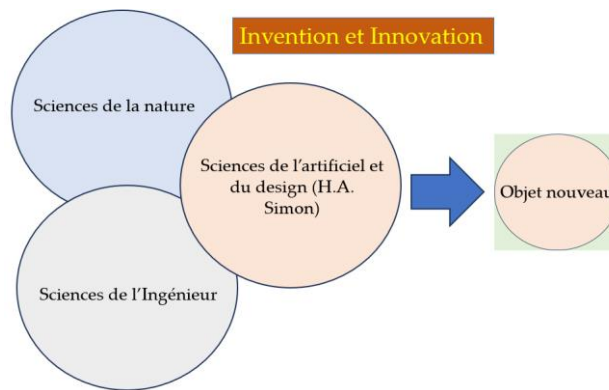


Figure 1. *Elargissement conceptuel dans l'invention et l'innovation*

- La notion de « rationalité limitée » est en rupture avec la vision d'une rationalité pure ;
- Les solutions « satisficing », décrivent des conclusions « acceptables » dont on se satisfait faute de pouvoir, en pratique, déterminer une solution optimale. Des situations complexes amènent à des approches heuristiques avec pour conséquence heureuse une transition vers un déterminisme utilitariste. Cette vision pragmatique n'est pas de la recherche opérationnelle qui vise à calculer une solution optimale sans réellement se préoccuper des interdépendances complexes ;
- La notion de « conception sans but final », part de l'idée que la confrontation à de nouvelles expériences peut entraîner une évolution des critères de choix. Pour Avenier (2019), « il s'agit d'une conception « téléologique de l'analyse fins/moyens »: les moyens mis en œuvre en contexte pour atteindre les fins suscitent souvent une évolution des fins » ;
- La notion de « quasi-décomposabilité » comme outil pour modéliser des phénomènes complexes, à partir de sous-systèmes « maîtrisables » ;
- La distinction entre « description d'état et description de processus ». Cette opération est particulièrement utile dans la description de la réalisation d'un objet, voire de son usage.

Encadré 1. *Fondamentaux de l'ouvrage « The Sciences of the Artificial » de Simon (1996)*

Si l'on examine la formation de l'ingénieur « post-normal » qui aura pour mission de trouver des solutions opérationnelles, il sera confronté à la gestion du fonctionnement du monde du passé avec des apprentissages par des méthodes mathématiques qui ont largement fait leurs preuves, en même temps que s'opèreront autour de lui de nombreuses transformations qui feront, à la fin, opérer une évolution radicale de son métier d'acteur technico-social. Par exemple, pour des productions nouvelles, en s'appuyant sur la théorie des parties prenantes et du management stratégique (Silberzahn, 2013), l'effectuation s'appuie sur une logique pragmatique robuste, car elle prend en compte des choix issus d'agents économiques intéressés, ayant le potentiel d'influencer la performance de l'entreprise. L'approche d'effectuation se structure à partir des interactions avec l'environnement. Cette méthode est itérative, évolutive et cumulative. « Pour l'effectuation, plus que la qualité du produit, c'est la capacité de l'entrepreneur à obtenir l'engagement d'un nombre croissant de parties prenantes, qui est la clé de la réussite du projet » (Silberzahn, 2013). Au moment où elle s'engage, l'entreprise n'a de manière évidente que peu d'information sur le futur d'une technologie naissante, elle peut difficilement bien planifier son association avec les concepteurs. Par ailleurs, « du côté secteur public, le système d'innovation n'échappe pas à l'interaction obligée avec le « mille-feuilles » administratif constitué de 6 000 guichets distribuant 400 aides qui soutiennent principalement l'emploi (beaucoup) et l'innovation (moins). Ce saupoudrage est expliqué par le fait que « les investisseurs publics ont peur de l'échec. Ils ne sont pas toujours à l'aise avec la technologie et craignent les remarques désagréables de leurs administrés » (Battini, 2015)...

De son côté, Norbert Alter (2010) a introduit le concept d'« invention dogmatique » correspondant à des inventions non appropriées, porteuses au final de régressions, de perte de temps et qui s'enlisent (mais cela n'empêche pas les inaugurations et les « beaux discours », mais des images ternies, des pertes financières, etc. (cf. nouvelles centrales nucléaires)...). L'image de l'idée « heureuse » se ternit avec le risque qu'elle ne soit plus capable de se ressourcer et de redevenir une innovation effective, apportant des progrès et une image positive à la société ! C'est en première lecture ce que l'on peut retenir aujourd'hui de thématiques émergentes (fabrication additive, nouveaux matériaux, numérique et IA, etc.). La notion de Système d'Innovation peut être exploitée en focalisant le curseur d'analyse sur ce qui peut induire le changement technologique (modèle du Technology Push), en orientant les politiques de recherche (couplage amont-aval). L'ambition serait de mobiliser les forces scientifiques, techniques, institutionnelles, entrepreneuriales en jouant sur un développement réaliste comme fin et moyen de progrès permis par de nouvelles idées validées par des preuves de concept en utilisant des exemples applicatifs spécifiques... Dans ce secteur, on se situe avec des marchés peu prévisibles, mais prometteurs, avec des frontières floues, associés à des structures industrielles au moins partiellement inexistantes. La présence de concepteurs intervenant sur des propositions originales qui doivent être profitables pourrait ainsi contribuer à des activités performantes pour autant qu'elles soient reconnues (et soutenues) comme telles (et non spécialement incluses dans des « grands programmes » nationaux ou européens). Ce sont sur ces marchés à attractivité particulière, à évolution rapide et impévue que les couples entre designers/concepteurs et industriels déterminés auraient certainement le plus d'impact pour la promotion de ce type de domaines (Le Bas, 2016).

Dans le monde ouvert, mais soumis à des contraintes en particulier environnementales, qu'il nous faut explorer, on peut légitimement se poser la question de savoir si, comme dans le contexte « pré-normal » ou simplement actuel, il serait possible de trouver, comme dans les relations de causes à effets, une approche applicable à la complexité si, lors de ces évolutions, le nombre des bassins d'attraction (qui peuvent être impliqués dans son traitement) et leurs qualités sont peu perturbés (André, 2023). Ou dit autrement, est-il possible de montrer la possibilité de disposer, comme le proposent Thomas et al (2004) des « labyrinthes chaotiques » qui contraignent la complexité ? Par ailleurs, comme le rappellent Eloundou et al (2023), l'apparition récente sur le marché de systèmes d'IA générative de type ChatGPT va modifier profondément les modes de formation et les relations des étudiants avec leurs formateurs (l'intelligence artificielle générative permet de créer de nouveaux contenus en apprenant des modèles de données à l'aide d'algorithmes et de méthodes complexes inspirés du cerveau humain). Certaines institutions interdisent l'usage de cette IA tandis que d'autres intègrent des modèles génératifs dans leurs pratiques d'enseignement ou forment les étudiants à la

maîtrise de ces outils. En recherche, ils peuvent identifier des relations impensées entre données, d'où progrès... Fond et forme sont à revisiter complètement !

3.2. Accès à la connaissance ?

En examinant les programmes actuels de nombre d'Ecoles d'ingénieurs, la tendance académique dominante consiste largement à envisager des formations classiques, comme celles proposées pour des scientifiques « unidimensionnels », ce qui pour Dias de Figueiredo (2014) rend l'occurrence combinée des compétences en un seul diplômé d'ingénieur presque impossible (ce qui est le cas dans la « vraie vie » ; cf. introduction). Alors, l'embauche d'un jeune ingénieur dépend d'un grand nombre de facteurs qui doivent respecter un profil particulier attractif pour l'entreprise. L'humain est et reste (malgré ChatGPT !) au centre de toute création de valeur. Si l'on choisit une Ecole relativement à d'autres, c'est de manière évidente parce qu'il est possible de faire un choix qui repose pour l'essentiel sur l'image de l'organisation de formation professionnelle. Pour rappel, il suffit de regarder les programmes pour se rendre compte des tensions qui existent entre enjeux de formation scientifique (apprentissage rapide d'origine scientifique) et enjeux créatifs (problem solving) dans ces Ecoles plus ou moins hiérarchisées relativement à ce prisme (et par la commission du titre d'Ingénieurs qui n'a pas toujours compris l'importance des ruptures qui viennent d'être évoquées).

En dehors de stages industriels, la formation relève plutôt de la pensée calculatoire, modélisatrice et formalisatrice. Que fait-on alors quand la question est complexe et ne peut être abordée dans sa globalité par les « bonnes » méthodes déterministes porteuses de certitude enseignées par les « pairs » ? Doit-on changer d'échelle comme pourrait le faire un physicien ou investir la complexité ? S'il peut être utile de garder une mémoire sur comment on approfondit un sujet scientifique, plutôt monodisciplinaire, l'apprentissage par la complexité relève de l'urgence (un ingénieur doit rester « opérationnel », ses produits doivent respecter la loi, ne pas entraîner d'accidents, etc. le plus longtemps possible et les formations de base doivent anticiper sur les pratiques futures). Il n'est pas ici prévu d'engager un discours sur cette apparente non-discipline scientifique associée à son métier, mais de faire prendre en considération le besoin d'accès à une connaissance nécessairement métissée via l'interdisciplinarité permettant l'acquisition de compétences transverses et plus encore connectives. Elles devraient être valorisées aujourd'hui, car associées à de précieuses capacités d'empathie et d'innovation en situation complexe (Christensen, Dyer et Gregersen, 2013). Il s'agit bien de permettre un « lâcher-prise » pour que les étudiants sortent de leurs « zones de confort » pour trouver des pistes de solution originales dans leurs domaines grâce à l'exploration d'un monde qui, dans leur Ecole, leur est normalement étranger (cf. Pinker, 2011).

Cette science rationnelle de fusion de savoirs doit favoriser une nouvelle méthodologie qui doit aider à guider son développement (limité par des jargons spécifiques disciplinaires). « L'incertitude n'y est pas bannie, mais gérée, et les valeurs ne sont pas présumées, mais explicitées. Le modèle d'argumentation scientifique n'est pas une déduction formalisée, mais un dialogue interactif. La science paradigmatique n'est plus celle dans laquelle le lieu (dans l'espace et le temps) et le processus ne sont pas pertinents pour les explications » (Funtowicz et Ravetz, 2020). Un premier aspect relève de la qualité de l'information scientifique à partager, analysée en termes de différents types d'incertitudes dans la connaissance et les fonctions prévues de l'information. Les « faits » scientifiques peuvent être de qualité variable selon les besoins disciplinaires et leur usage quantitatif doit faire l'objet d'un bon pouvoir séparateur pour s'engager dans des stratégies de résolution de problèmes, analysées en termes d'incertitude des connaissances, de modèles disciplinaires et par suite de complexité.

Pour Funtowicz et Ravetz (2020) la science appliquée est « orientée vers une mission » ; la consultance professionnelle est « au service du client » ; et la science post-normale est « axée sur une question »... tous ces domaines utilisent de fait l'outil heuristique. Or, « le succès de la science traditionnelle tenait en grande partie à son pouvoir de faire abstraction de l'incertitude des connaissances et des valeurs, comme le montre la tradition dominante de l'enseignement des sciences, qui a créé un univers de faits incontestables, présentés de manière dogmatique pour être assimilés par

des étudiants dépourvus d'esprit critique » (Funtowicz et Ravetz, 2020). Il n'est pas nécessaire d'attendre que tous les faits soient connus, mais il faut disposer d'un ensemble de données scientifiques nécessaires aux processus de décision. Parfois, des éléments de causalité sont extrêmement incertains... Alors, les scientifiques s'interrogent sur l'art de travailler en temps d'incertitude, avec des données partielles ou incertaines et prennent beaucoup de précautions sur la robustesse de leurs avis. « Alors, comment conseiller par gros temps ? » (Leglu, 2021).

3.3. Sciences du design

Avec les sciences de l'artificiel, Simon (1996) a montré qu'il était possible, moyennant un usage des « sciences du design » dans le traitement invention-innovation, de sortir épistémologiquement de cette difficile transition entre une idée et sa réalisation pratique (transformer du complexe en causal en acceptant des solutions juste « satisfaisantes »). Ainsi, nous traitons de rappels concernant ces sciences particulières avec les relations avec d'autres paramètres entre corpus général et innovation. Par ailleurs, les « lois de la nature » concourent à la rationalité et au développement d'une opération d'invention en champ incertain, mais ne déterminent pas chez Simon les idées et leurs conceptions (cf. encadré 1). Les buts applicatifs servent à motiver l'activité de conception, ce qui peut se traduire par une certaine réflexivité. Dans la conceptualisation d'une opération de conception d'un objet original, plusieurs acteurs sont « convoqués » pour permettre une innovation assignée à un traitement sur les sciences de l'artificiel (cf. figure 1) :

- L'idée initiale s'appuyant sur la nature et encadrée par des connaissances scientifiques et techniques en sciences de l'ingénieur ;
- Transformation de l'idée en preuve de concept (POC). Cela nécessite que l'on puisse s'appuyer sur des pratiques de design pour réaliser ce POC, ce qui peut conduire à un appel aux connaissances scientifiques « normales », voire à des demandes d'approfondissement spécifiques ;
- En interne à la composante design, l'approche par la complexité de certains phénomènes doit être traitée dans le cadre d'expertises heuristiques spécifiques (qui limitent la robustesse des conclusions) ;
- La conception de ce qui est considéré comme un sous-système peut être réalisée dans une relative indépendance vis-à-vis des autres. Mais, il n'y a aucune raison pour qu'une telle décomposition soit unique. Hiérarchiques, seules les propriétés agrégatives des sous-systèmes sont concernées, pendant que les relations faibles sont ignorées (Séris, 2000) ;
- Des solutions « satisficing » peuvent être proposées pour réaliser un POC qui permet d'en vérifier l'opérationnalité ;
- L'invention étant validée techniquement, une autre évaluation doit être menée pour une transformation de ce savoir technique en innovation (André, 2023) ; d'autres critères concernant la société sont à prendre en compte avec de possibles feedbacks entre un démonstrateur susceptible d'être industrialisé et le POC.

« Les connaissances fondamentales en sciences de l'artificiel et en sciences of design (Hodgkinson et Starkey, 2011) s'expriment comme des propositions d'intelligibilité » (Avenier, 2019). Cette situation doit prendre en considération, en dehors du porteur de l'idée initiale, d'autres partenaires plus ou moins éphémères dans le processus d'innovation et, quand c'est possible, une décomposition des expertises en sous-systèmes. Messerschmitt (2011) énumère cinq attributs clés qui caractérisent une bonne conception modulaire :

- « Fonctionnalité : Chaque module offre un ensemble de fonctions qui sont conceptuellement liées, de sorte que le champ d'application global du module semble représenter un regroupement naturel ;
- Hiérarchie : Les modules peuvent être décomposés en sous-modules et cette structure interne n'est généralement pas visible de l'extérieur ;
- Séparation des préoccupations : Chaque module n'est que faiblement couplé à d'autres modules ;
- Interopérabilité : Les modules peuvent facilement interagir entre eux ;

– Réutilisation : Les modules peuvent être réutilisés dans plusieurs systèmes ».

Ce type d'opération fait l'hypothèse d'un travail approfondi, mené par des spécialistes, c'est-à-dire des personnes réellement motivées et compétentes. Dans ces opérations en interaction, il s'agit bien de montrer tout l'intérêt applicatif de l'idée, en montrant ses avantages, ce qui doit conduire à une bonne proposition de valeur, l'organisation des ressources, la conciliation de valeurs différentes portées par des experts spécialisés. Ces mécanismes génératifs de cocréation de valeur mettent l'accent sur les intentions stratégiques des acteurs à l'origine du projet. L'état de l'artéfact au cours du processus de recherche fait l'objet de l'encadré 2 s'appuyant sur les travaux de Meyer et al (2012).

- Phase d'analyse de l'état de l'artéfact : Identification de l'intérêt applicatif de l'idée et des concepts pour envisager une suite ;
- Collecte d'informations, clarifications des idées et concepts initiaux retravaillés en vue d'un travail en ingénierie ;
- Proposition d'une solution causale : Proposition initiale avec pour intention de convaincre (en particulier les décideurs) afin d'obtenir le soutien nécessaire au développement ;
- Conception : Les objectifs initiaux de réalisation de l'artéfact sont spécifiés ;
- Analyse des verrous : Bibliographie approfondie et, si nécessaire, appel à la science (dont la science du design dans ses caractéristiques in-intentionnelles) pour des approfondissements ;
- Exigences : Spécification des exigences de réalisation du POC, puis de l'artéfact, qui peuvent être des exigences commerciales, architecturales, fonctionnelles et non fonctionnelles.
- Conception du POC : Améliorations techniques à entreprendre et relations avec la demande potentielle du monde économique et de la société en général ;
- Conception de l'artéfact (démonstrateur/prototype) : L'artéfact prend la représentation souhaitée dans l'état final projeté ;
- Evaluations : Elles doivent être menées à chaque étape, impliquant des retours pour envisager des améliorations ou des arrêts. En fin d'opération, la démonstration de la viabilité de l'artéfact doit permettre de justifier l'effort de recherche et de s'assurer que la solution produit les résultats escomptés. L'usage de l'artéfact doit montrer l'utilité recherchée pour les parties prenantes avec une nouvelle analyse ou une nouvelle conception du problème ou de l'artéfact à envisager ;
- Diffusion : L'artéfact est, en cas de succès, prêt à être diffusé.

Encadré 2. *Etat de l'artéfact au cours du processus de recherche*

La figure 2 issue de Alturki, Bandara et Gable (2012) illustre également les liens entre éléments présentés dans l'encadré 2, en particulier des opérations de recherches scientifiques représentatives des « sciences du design ». La constitution d'une équipe d'innovation scientifique non monochrome implique généralement le choix d'un (bon) animateur, reconnu déjà pour lui-même, pour son aptitude au mouvement, indépendamment de son inscription dans des collectifs, mais aussi en tenant compte de sa faculté d'entraîner. Ce choix, comme le signale Castel (2003), montre que « la solidarité des statuts professionnels tend ainsi à se transformer en concurrence entre égaux ». Pour autant que la notion d'égalité soit parfaitement éclaircie, il y a individualisation, personnification et définition de la performance individuelle. Au contraire du travail à la chaîne, du travail du « chercheur indépendant » et des opérations stéréotypées, l'interchangeabilité n'est plus de mise.

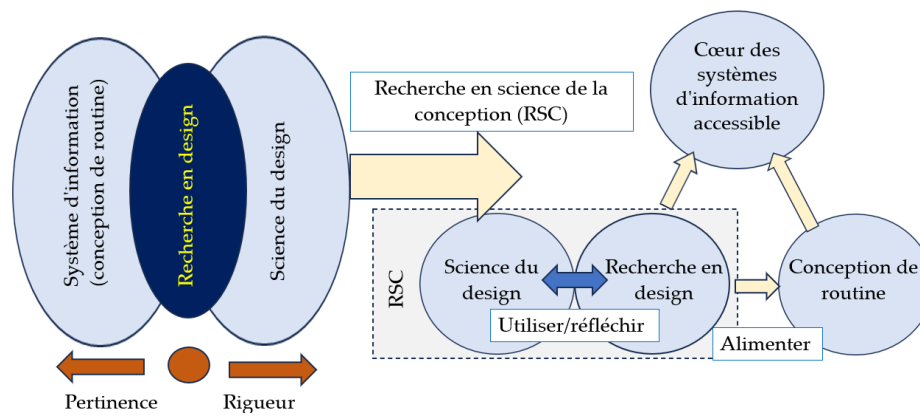


Figure 2. La recherche en sciences de la conception et le cœur des systèmes d'information accessible

3.4. L'outil heuristique

« Un « paradigme technologique » définit de manière contextuelle les besoins à satisfaire, les principes scientifiques utilisés pour cette tâche, la technologie matérielle à utiliser. En d'autres termes, un paradigme technologique peut être défini comme un « modèle » de solutions à des problèmes technico-économiques sélectionnés, basé sur des principes hautement sélectionnés issus des sciences naturelles,... conjointement avec des règles spécifiques visant à acquérir de nouvelles connaissances et à les protéger, dans la mesure du possible, contre une diffusion rapide auprès des concurrents ». C'est ce que Dosi (1982) a proposé pour être en particulier mis en regard avec les paradigmes scientifiques au sens de Kuhn. Mais, à ce stade, qui peut être repris par ChatGPT parce qu'on reste dans le déductif et le déterminisme, il n'est pas encore envisagé de fournir « clé en main » le paradigme technologique d'un système complexe ! D'ailleurs, Montagnon et Braune (2023) parlent déjà du modèle JEPA qui se concentrerait sur la comparaison de représentations abstraites d'images, de sons ou de textes en lieu et place de récolter des téraoctets de données (comme le fait le Machine Learning), pour diminuer les imprécisions inhérentes à l'IA générative... Attendons la publication de ses performances !

Avec la complexité, le cadre scientifique ne peut pas toujours exploiter des paradigmes fondés sur des expériences s'appuyant sur l'explication rationnelle et la prédiction, mais au mieux fournir des modèles mathématiques et des simulations informatiques. Quand « a » joue sur « b » qui joue sur « a », il est par le biais de ce type d'outil possible de réaliser une (des) preuve(s) de concept (POC) qui conduisent à des résultats tangibles qui, avec une précision acceptable entre réalité et modèle doivent se traduire par le développement de procédures déterministes permettant le passage de l'idée à une possible construction/production industrielle. Des incertitudes systémiques interviennent quand le problème à traiter porte sur la compréhension ou sur la gestion d'une réalité intrinsèquement complexe dans laquelle il peut être avantageux d'identifier les éléments qui sont les plus importants ou les plus dominants, puis de caractériser l'ensemble des systèmes en fonction de ces éléments. C'est sur ces différentes opérations que de nouvelles méthodes doivent être développées pour rendre notre ignorance utilisable. La fraîcheur des étudiants non totalement formés aux méthodes traditionnelles peut soutenir cette proposition dans le cadre d'applications où la complexité joue un rôle déterminant.

Cela signifie que les acteurs inclus dans l'opération doivent exploiter les faits (avec si possible la précision qu'on peut leur attribuer ou mieux, mesurer) et les connaissances stabilisées au maximum en même temps que la prise en compte heuristique de l'incertain (problème de la construction de l'expertise, selon André, 2023). « Car une définition de l'ingénierie est la suivante : l'utilisation d'heuristiques pour provoquer le meilleur changement dans une situation mal comprise et dans les limites des ressources disponibles. Car l'ingénierie, aussi poussée soit-elle, comme la technique, a l'inconvénient de son avantage : elle est originellement dans l'action et non dans le savoir. Elle sera toujours sous la pression du temps, des circonstances et des ressources limitées, elle est en quelque sorte un condensé de science dans un monde de ressources rares, dans un temps limité et sous la pression d'exigences fortes » (Dubois et Brault, 2021). Il y a alors possibilité d'expérimenter, de voir

comment le dialogue se met en place durant cette période de forte mobilisation cognitive... Au fond, comme le rappelle Reynaud (1989), « la méthode heuristique est une mauvaise méthode pour prouver, mais une bonne méthode pour découvrir ». C'est bien l'enjeu de l'approche proposée pour avancer en tentant de retrouver du sens et de la cohérence entre les différents partenaires impliqués.

Gregor et Hevner (2013) considèrent l'existence de quatre configurations types d'inventions : la conception routinière qui applique des solutions connues à des problèmes connus ; l'extension de solutions connues à un problème nouveau ; l'amélioration reposant sur des solutions nouvelles pour des problèmes connus ; et l'invention qui consiste à créer à partir d'idées neuves conduisant à des propositions complexes, des solutions nouvelles pour répondre à des problèmes nouveaux. On passe ainsi d'une recherche incrémentale à quelque chose de plus disruptif. Or, une technologie peut être construite autour de l'exploitation fiable d'un effet donné, tel qu'envisagé par un principe d'utilisation. Alors l'innovation qui en résulte possède son concept fondateur, un but, une combinaison de composants connus, une architecture, et incarne un principe générique qui exploite un phénomène de base. Cependant, pour Lévi-Strauss (1990), après la « mise en place » de l'invention, la première démarche pratique serait rétrospective en considérant un ensemble constitué, formé d'outils et de matériaux qui serviront à la continuité des productions industrielles. En effet, s'il est une chose que les ingénieurs connaissent bien, c'est qu'ils seront amenés à modifier ou à reprendre la conception de leur prototype en cours de production et que cela peut être avantageux de se rapprocher de ce qui a précédemment fait succès.

Des scientifiques considèrent « comme une évidence que l'hybridation disciplinaire est la clé de l'innovation scientifique et technique. Nul n'ignore plus aujourd'hui que l'on n'innove jamais qu'à la marge des disciplines constituées. L'indiscipline est même invoquée comme la condition des véritables découvertes et les exemples de sérendipité ne manquent pas, qui témoignent de la fécondité du hasard et des francs-tireurs qui savent s'en emparer » (Besnier et Perriault, 2013). Mais, ensuite, la complexité généralement associée à l'interdisciplinarité est une situation avec une variété d'éléments, de formes et de natures différentes en interactions dynamiques avec des partenaires d'horizons différents dont le relationnel (qualité des liens humains, organisation, communication interne, « effets de robe », langage commun, etc.) peut affecter toute expertise.

L'innovation fait bouger la complexité d'une situation en modifiant artificiellement une relation entre tous les éléments en interactions (elle impose un chemin original entre éléments sous la forme d'une convergence imposée). Quand elle est disruptive, avec des caractéristiques d'interaction entre acteurs multiples, d'incertitude, d'imprévisibilité, de coévolution du projet et de son contexte, etc., elle s'inscrit alors dans une problématique de complexité. Celle-ci peut être réduite par des mesures quantitatives précises qui contraignent le système. D'aucuns estiment qu'elle implique pour émerger une stratégie évolutive (inventer en marchant). C'est cette vision (André, 2018 ; 2023) qu'il est souhaité questionner à partir des innovations de rupture impliquant la convergence de disciplines disjointes (cf. figure 3).

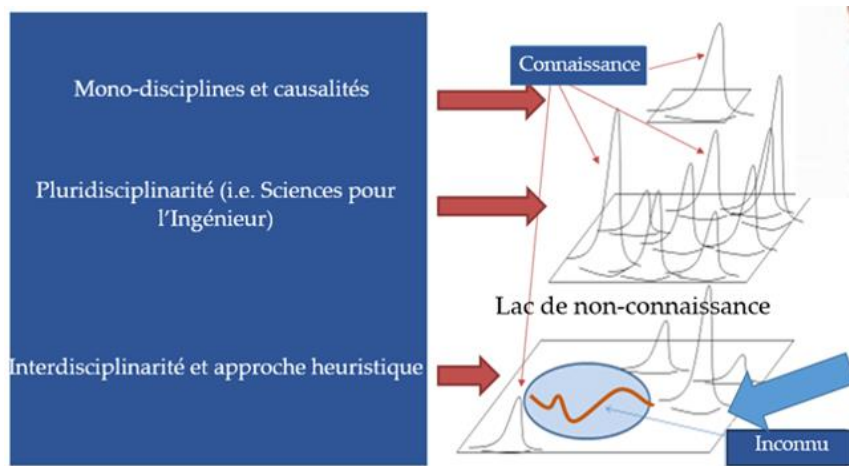


Figure 3. L'outil heuristique : Champs d'expertise (les gaussiennes approximatives représentent les acquis scientifiques issus du travail de recherche antérieur ; selon les formes d'expertise, le domaine est couvert (causal, algorithmique) ou partiellement couvert (heuristique)). La ligne rouge sur le « lac » est le chemin retenu qui doit conduire à des solutions satisfaisantes

On peut ainsi définir l'approche heuristique comme une méthode empirique (mais de bon sens), approximative, intuitive, mais rapide et audacieuse/risquée pour trouver une possible solution à une question pour laquelle tous les savoirs ne sont pas stabilisés, et par suite disposer d'un champ d'expertise, partiellement déductif, et peut-être accélérer la résolution du problème dont une (parmi d'autres) solution envisageable est mise en lumière. Aucune idée ne naît « bonne » : elle ne représente qu'une nouvelle hypothèse, qui peut, peut-être, le devenir.

Remarque : Zhou et al (2022) tentent d'envisager des méthodes plus ou moins quantitatives pour permettre de lever les incertitudes épistémiques (informations insuffisantes) avec pour objectif la meilleure décision possible (Wen et al, 2017). Ces auteurs font état de nombreuses méthodes allant de la logique floue (Zeng, Wen et Kang, 2013), la théorie des intervalles (Wang et al, 2018), la théorie des évidences (Wang et al, 2022), etc. Ces modèles posent cependant quelques problèmes, le besoin de données rendues au moins partiellement quantitatives (avec le risque que l'induction soit absente ?) et l'hypothèse d'une relation unimodale à un seul optimum.

Les actions interdisciplinaires incluses dans l'expertise heuristique, impliquant des experts indépendants doivent accepter la confrontation honnête entre spécialistes et l'affirmation de la valeur heuristique des controverses (sans les « effets de robe » de certains experts). Il est donc souhaité disposer, quand c'est possible, de conclusions de clarification les plus précises et les plus fiables possibles des propositions résultant de l'approche menée par les disciplines associées au projet. L'expertise interdisciplinaire est un processus délicat associant le bon choix des disciplines, des experts et de l'organisation pour atteindre les objectifs de clarification et de synthèse avec des apprentissages partagés. Cette activité peut être programmée par des entreprises, mais plus difficilement dans le monde universitaire parce que la coopération n'y est pas un processus naturel. D'ailleurs, Sevtsuk et al (2022) montrent que l'aménagement des campus et la conception des bâtiments, pour créer de façon intentionnelle des allées de promenade quotidienne qui rapprochent les chercheurs les uns des autres semblent, avec les cafétarias, être efficaces pour le MIT.

Certains chercheurs, s'exprimant sur le fonctionnement de la recherche académique rappellent les contraintes et parfois les obstacles qui limitent leur travail : difficulté de disposer de financement, évaluation, carrière, positionnement dans la structure de recherche, difficulté de rencontre en local d'autres chercheurs impliqués dans des disciplines différentes,... Cet inconfort au travail peut induire des mises à l'écart d'un projet divergent ou bien la soumission au système conservateur de management de la recherche avec une proposition plus « conforme » aux attentes. Veissier (2022) y a montré le poids du doctorat dans la recherche française, car pour une part, le chercheur académique permanent fait sa recherche « par personne interposée ». Un encadrement insuffisant, un respect

modeste de l'engagement pour le travail de formation par la recherche peuvent également limiter l'émergence d'idées radicales. Heureusement, ce n'est pas toujours le cas ! Dans ces situations extrêmes, l'aide à la clarification est alors exclue (ce qu'on n'observe moins dans des entreprises motivées pour le développement économique de leur inventivité).

D'une manière générale, les innovations de rupture se retrouvent face à plusieurs difficultés liées à la nature particulière de son objet : « la première c'est qu'une [invention] de rupture ne se décrète pas ; la seconde c'est qu'une [invention/innovation] de rupture met très longtemps à avoir un impact significatif en termes de chiffre d'affaires et la troisième, c'est que le risque est grand que l'entité soit rapidement isolée du reste de l'organisation » (Silberzahn et Rousset, 2019). Mais, même suite à une opération de clarification (André, 2023), la sélection d'idées de rupture n'est ni facile ni intuitive. Il est ainsi difficile de soutenir systématiquement un possible développement ne serait-ce que, dans les entreprises, l'invention peut obliger des modifications coûteuses (obsolescence imposée des procédés d'usage antérieur). Il y a donc risque de voir les idées d'innovation radicale rejetées (Bessant et al, 2010). Sans disposer des regards de partenaires (pour autant qu'on les trouve disponibles), il existe un risque que des idées prometteuses soient rejetées en raison de contraintes de temps et, sans traçabilité, elles vont disparaître... A l'université, avec le fonctionnement des appels à financements encadrés, il y a tendance à « papillonner », en suivant les appels à proposition, ce qui peut être constitué une opportunité de créativité, mais on ne dispose pas de données sur ce sujet. D'une manière générale, il convient de disposer de valeurs fortes pour changer les traditions par la disruption. Pour autant, le chemin n'est pas tracé... et c'est l'aller au « secours de la victoire » qui est valorisé !

Des commentaires présentés ci-dessus, une première remarque doit être faite, celle concernant l'interdisciplinarité qui, pour une formation cadrée fait obligation d'échanges avec d'autres domaines disciplinaires (ce que pratique modestement le chercheur dans son laboratoire). L'objet de ce mode d'action est de traduire les problèmes considérés comme du « monde réel » en actions interdisciplinaires scientifiquement possibles à partir d'une évolution technoscientifique qui, certes, entre souvent en continuité avec les activités précédentes, mais qui n'en est pas pour autant un prolongement (en particulier, dans la signification sociale associée) (Gras, 2013). Si, pour une part importante, l'industrie maîtrise ces approches pour sa survie, et en dehors des discours incantatoires de nombre de donneurs d'ordre nationaux et/ou européens, cette volonté qui promet que « le tout est supérieur à la somme de toutes ses parties » est souvent mise à mal. C'est sur cette base solidifiée qu'il est possible de traiter par des exemples des situations heuristiques.

3.5. *Invention et nature*

La technologie n'a pas été associée à court terme par les résultats de la recherche scientifique, car les ruptures relevaient essentiellement du domaine des concepts. Dans le temps présent avec de nouvelles avancées technologiques, science et technique ont fait naître des menaces pour notre survie et pourtant, cette survie passe par des flux amplifiés d'idées originales, quel que soit le domaine concerné qui risque d'avoir à passer par un traitement heuristique (cf. l'exemple de l'impression 4D selon Demoly et André, 2022). Dans tous les cas, l'imagination est constamment mise au défi d'anticiper suffisamment bien pour qu'il y ait le moins de corrections nécessaires, afin que le monde soit ce que l'imaginaire attend...

Selon Ininou et Loilier (2021), « le terme « idée » est souvent défini tour à tour comme une représentation mentale visant à résoudre de façon nouvelle un problème déjà connu ou à résoudre un problème nouveau, une intention d'action, une proposition porteuse d'adaptations incrémentales ou de ruptures majeures dans la conception de nouveaux produits ou services, une capacité à réaliser une production qui soit la fois nouvelle et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste, une ressource stratégique, ou encore comme un élément déclencheur du processus d'innovation ». Autre critère à grand nombre de degrés de liberté ! La sélection d'idées constitue donc une reconnaissance de l'intérêt général de l'offre, mais devient ensuite un vrai problème d'évaluation, de choix et de ressources pour une décision d'engagement dont le risque a besoin d'être estimé. Pour évaluer, il convient d'être

compétent sur un sujet ouvert, ce qui peut poser plusieurs questions : si un évaluateur a la capacité en interne à soutenir une proposition radicale, alors, pourquoi faire appel à l'externe puisqu'il maîtrise le sujet ? S'il est « juste » généraliste, comment relier finement projet et évaluation ? Etc. La prise de conscience des enjeux devrait être présente aux niveaux institutionnels, entrepreneurial et/ou sociétal, mais compte-tenu de la complexité des propositions radicales qui peuvent être faites, de la difficulté de leur compréhension/perception (avant une possible appropriation), l'opérationnalité des changements est forcément ralentie, malgré des sociétés ouvertes à l'innovation, ce qui constitue un paradoxe. Il faut donc faire le plus simple possible !

Dans les groupes, l'indicateur le plus immédiat des phénomènes de guidage est naturellement lié aux critiques mutuelles qui sont échangées par les partenaires d'un projet au cours du processus de recherche. On peut rappeler à cet égard les observations de Shaw (1932) : « le succès des groupes dans l'atteinte de solutions correctes peut être attribué à la fréquence avec laquelle les suggestions insatisfaisantes d'un individu se trouvent rejetées par les autres « en temps réel » ». Mais, dans la mesure où le développement d'idées profitables associées à des ruptures implique une approche interdisciplinaire, une question doit être posée : « est-il possible de créer ou de développer un groupe dont tous les membres seraient véritablement créatifs, même si l'originalité et le talent ne sont pas naturellement distribués égalitairement, sans qu'un leader assure sa progression et sa cohésion ? Si la réponse est « il faut un leader », alors une autre question se profile : comment assurer ce leadership ? Le leader doit-il être démocrate, autocrate, charismatique, etc. ? » (Enriquez, 2017). Plus qu'une compétence consensuelle, c'est la confrontation des points de vue et des références qui paraît la mieux à même de susciter l'apparition de la nouveauté recherchée, à condition que les divergences soient réellement prises en compte (cf. Hall et Watson, 1970). Après avoir tenté de tester l'émergence spontanée de créations en libérant l'imaginaire pour qu'émerge une spontanéité, le résultat net est que cette activité est purement utopique (au moins sur les expériences réalisées, en nombre suffisamment modeste pour qu'une généralisation soit délicate). « Une créativité qui jaillirait d'elle-même est, en réalité, un leurre et un faux-semblant » (Chouvier, 2017).

Mais, actuellement, la majorité des engagements interdisciplinaires relève d'aventures à base de rencontres individuelles, de parcours personnels, d'affinités et de liens amicaux, d'opportunités, de hasards. C'est donc une question de personnes (Coutellec, 2009). Cet aspect de relations interindividuelles est particulièrement critique et peut être, indépendamment de soutiens financiers, responsable de nombreux échecs liés à l'absence de connaissances de personnes susceptibles d'aider à définir ou de participer à l'épistémologie du POC.

La construction intellectuelle de cette preuve de concept nécessite en principe la présence et l'action proactive d'un médiateur, interface entre les représentant des disciplines concernées par le projet, ce qui permet d'explorer un champ de possibles. Son rôle lui permet également d'intégrer et de mutualiser des considérations issues des disciplines pour l'action (participation à une démarche interactive qui permet en permanence une ré-interrogation des sciences et des techniques associées au projet, par nature systémique). Sans médiateur, pas de salut ! Nous avons de surcroît remarqué que l'engagement dans une opération à risque qui correspond à favoriser une créativité inventive pouvait être considéré comme peu séduisant pour des chercheurs disciplinaires. Ceci est d'autant plus vrai quand ceux-ci sont formatés pour produire des publications, certes de bon niveau scientifique, mais juste cantonnés à l'approfondissement robuste de leur domaine restreint (cf. Collinet, Terral et Trabal, 2014).

Il existe des biais implicites contre le développement de la créativité, par peur de sa nature perturbatrice et de ses remises en cause (adaptation permanente des attentes à la lumière d'une évaluation prospective selon Jankélévitch, 1966). La créativité signifie le changement, sans la certitude de résultats souhaités et souhaitables. On accepte donc d'associer à la créativité l'échec possible comme partenaire de l'opération. En effet, il faut aller plus loin que la simple idée, ne serait-ce que pour réaliser une preuve de concept, voire un démonstrateur. Si Dortier (2015) a raison en écrivant « Les innovations sont-elles révolutionnaires ? [Sans doute moins que l'invention], elles reposent sur l'originalité, le surprenant, l'inattendu ? Au contraire, la plupart sont plus ordinaires. Elles reposent sur

des lois d'évolution simples et prévisibles que la nature elle-même sait mettre à profit. Innover, c'est [juste] sortir des sentiers battus ». Alors, il ne s'agit que d'arrangements à partir de connaissances connues ! Mais, est-ce encore vrai si on sort des discussions superficielles du « café du commerce » ?

Très vite, la transcription de l'idée qui pouvait au départ disposer de nombreux degrés de liberté, de possibles détournements, va devenir un construit de moins en moins flexible, adaptable, modifiable, jusqu'à ce qu'il soit figé en particulier après le POC (Preuve de Concept)... Et, financièrement, c'est au stade de l'industrialisation que le risque va devenir majeur puisqu'il faut envisager des modes de production non flexibles, d'où un risque financier qui a besoin d'être maîtrisé. « Favoriser l'émergence d'écosystèmes innovants, ce n'est pas seulement peser sur la spécialisation, accroître l'autonomie stratégique, c'est une autre manière d'envisager la sécurité dans une perspective dynamique. En matière de recherche plus qu'ailleurs, la destruction créatrice fait son œuvre. Une stratégie efficace de reconquête industrielle devrait traiter les facteurs généraux et spécifiques de la perte de compétitivité du site France » (Aghion et al, 2021)...

L'imagination est une mise en image de formes de désir, de rêveries, voire des fantasmes intimes ; elle produit selon Alapetite (2014), le matériau « fluide » de base de la création, qui, elle, correspond plutôt à l'aptitude à transformer ce « matériau » en signes communicables aux autres. « Terme désignant la possibilité qu'a un individu, dans les processus de résolution de problèmes, de trouver des relations inédites, de produire de façon relativement courante et souple des idées nouvelles et des solutions originales », telle est la définition de Rouquette (2007) de la créativité. Cet auteur complète son propos en écrivant : « Ce n'est pas la valeur intrinsèque qui fonde la légitimité, c'est l'inverse. Et dès lors la question de la créativité n'est pas celle de la reconnaissance de la valeur, mais celle de la valeur de la reconnaissance »...

Comme cela a déjà été discuté, un fil conducteur de la créativité repose dans les descriptions désormais classiques du thème par Guilford (1956) avec les concepts de divergence et de convergence (André, 2023). Le concepteur identifie, dans ce qui lui est accessible rapidement, les options en explorant un éventail de solutions et d'informations issues de son savoir. Ensuite, il fera, autant que faire se peut, la distinction entre ces solutions sans trop les approfondir, mais avec bon sens. C'est sur cette base d'une évaluation (« au doigt mouillé ») qu'il pourra sélectionner un résultat unique approprié à la question posée (« satisficing »). On l'aura compris, à ce stade, il ne s'agit que d'un brouillon qui va permettre d'aborder les suites visant l'invention, puis l'innovation. En remarque, si ce « brouillon » peut conduire à la satisfaction de besoins sociétaux, l'auto-évaluation et l'autosatisfaction associée ne sont pas les garants d'un choix optimal ! L'imagination concernant le même sujet, mais traité par une autre personne n'a aucune raison d'être une copie à l'identique de la créativité initiale. Elle devrait être, au contraire, paradoxalement, source de variété parce que leurs auteurs disposent de cultures et d'envies variées. C'est la diversité des contextes et des environnements et l'hétérogénéité des concepteurs qui empêcheraient la convergence uniforme des processus d'invention... Entre petite ou grande invention, Wilson, Guilford et Christensen (1953), considèrent qu'une idée est d'autant plus originale qu'elle est plus rare dans la population considérée, plus ingénieuse ou qu'elle associe des éléments de connaissance plus éloignés...

3.6. Emergence de l'idée

Dans son discours d'investiture, le Président Roosevelt (cité par Pigasse, 2014) avait dit : « Leurs efforts portaient l'empreinte d'une tradition périmée. Ils en vinrent aux exhortations, plaidant la larme à l'œil pour le retour à la confiance. Ils ne connaissent que les règles d'une génération d'égoïstes. Ils n'ont eu aucune vision et, sans vision, le peuple meurt ». De fait l'idée émerge au cours de l'action comme une intrusion contingente, car elle rompt ou apporte des éléments nouveaux qui sortent des savoirs précédemment acceptés (d'où idée d'une « appréhension confuse » pour Lavelle, 1992), socle éphémère d'apprentissage transformateur (de manière plus ou moins radicale). Martindale (1999) nous rappelle d'ailleurs que la pensée créative requiert une combinaison d'éléments courants comme l'intelligence, la persévérance, une réflexion divergente, et par suite une capacité à penser autrement.

Pour cet auteur, ce qui singularise la créativité, c'est le rassemblement de ces différents éléments sur une seule personne. L'« action intelligente », différente de la méthode dite d'essais et erreurs, peut selon Dewey (1930) utiliser la pensée créative pour utiliser les capacités présentées ci-dessus pour « s'entraîner (par imagination) dans différentes directions d'actions concurrentes » constituant, au moins en partie, des scénarios d'invention.

Il s'agit d'un usage heuristique qui doit conduire dans ses contenus, de valeurs épistémiques comme la cohérence, la simplicité, la parcimonie (cf. rasoir d'Occam), ou non épistémiques comme des valeurs socio-économiques, éthiques, ou déterminées par des biais pouvant avoir une influence sur l'identification du problème ou le choix des données (Ruphy, 2015). « Il est à noter qu'une fonction épistémique ne détermine pas univoquement un usage, ni un usage une fonction » (Varenne, 2022). Cet apprentissage se transforme ultérieurement par un changement de représentation et par suite, de concrétisation d'une idée. C'est aussi à partir de cet espace de connaissances préalables, associé à une représentation (ancienne), qu'émerge l'idée. Gambier (2019) considère qu'une « traduction » de l'idée passe par une sorte de hub, d'échangeur où se croisent diverses disciplines et/ou métiers, mais sans qu'on sache exactement les conditions et les effets de ces croisements : Pour reprendre la proposition de Marc Augé (1992), les disciplines convoquées seraient plutôt dans une relation de « consommation », de « digestion » avant de faire émerger une réciprocité, malgré une volonté initiale de partage dans/pour une rencontre qui doit être fructueuse. En effet, les notions de représentation, et surtout celle du changement de représentation, sont centrales puisqu'on vise à rendre crédible une idée pour la valider expérimentalement.

Un élément important doit être rappelé, c'est qu'émettre une idée nous demande d'être capables de sortir des sentiers battus et d'accepter des propositions alternatives à des propositions initiales, elles-mêmes, non approfondies. L'idée, pour beaucoup, est arrivée un peu par hasard ! Mais, pour Mishima (1989), « parler du hasard, c'est nier la possibilité de toute loi de cause à effet. Le hasard est finalement l'unique élément irrationnel que peut accepter le libre arbitre. Comme l'explique Horenstein (2002) : « S'il n'existe qu'une seule réponse au problème, et qu'il s'agit simplement de rassembler les pièces du puzzle, alors l'activité est probablement l'analyse ». C'est ce que fait le « bricoleur » qui rassemble des éléments scientifiques et techniques pour garder une idée du tout (en exploitant une capacité à corréliser de nombreuses idées et des informations venant de domaines différents). Le bricoleur un peu savant dispose donc d'une certaine culture dont des éléments sont organisés « jusqu'à ce que tout à coup – de manière presque surprenante – cela prenne du sens et que l'innovateur puisse dire « eurêka » » (Millier, 2016). En revanche, pour des situations plus floues et divergentes, les caractéristiques de l'idée ne sont pas complètement déterminées et le nombre de solutions et/ou voies de solution capables de satisfaire le besoin sous-jacent peut être élevé avec de nouveaux risques d'échecs.

Canguilhem (1957) a écrit : « Les questions authentiquement importantes sont les questions mal posées... Une question bien posée n'est déjà plus une question, puisqu'elle renferme tous les éléments de la réponse. Sans paradoxe, une question ne peut, en tant que telle, être que mal posée ». C'est un peu le but de l'opération de clarification (appréhension confuse), avec comme première mission de vérifier que si la structuration de l'idée ne fait pas sens, elle est jugée sans valeur (Cholle, 2020) par le soutien d'un groupe plutôt informel ne possédant pas de frontières précises. Ces derniers n'ont alors, dans l'action, pas de lien avec un organigramme et peuvent aisément franchir les frontières conceptuelles ou hiérarchiques... (pour autant qu'ils disposent de l'accord au moins tacite de la part de la hiérarchie). C'est un moment un peu magique où l'idée naissante n'est pas encore confrontée aux contraintes de la recherche et effleure à peine ce qui pourrait être une réalité.

Dans son premier moment, l'amorce (plus ou moins robuste à ce stade) de l'idée est aussi ontologiquement antérieure à l'Eureka d'Archimède, c'est-à-dire à ce moment où « l'on trouve subitement la solution d'un problème, une bonne idée » (Rey, 1992). Lavelle (1992), rappelons-le, parle d'une situation qu'il appelle « appréhension confuse », point de transition entre un avant et un après (André, 2023). Le geste créateur est une condition nécessaire à la production d'une possible invention dont la synthèse plus ou moins intuitive, mais réactive, produite dans l'opération. Elle doit

être élaborée, objectivée pour rendre accessible une proposition d'idée inventive. « La dialectique à l'œuvre lors de cette séquence longue, entre le geste créatif et sa pleine réalisation, englobe ainsi la genèse, la circulation, la réception et l'appropriation de connaissances nouvelles, et ceci à un niveau collectif aussi bien qu'individuel » (Ancori, 2014).

Au départ dans une coopération idée-expertise de clarification d'une pré-idée, qu'elle qu'en soit la nature, il y a normalement un désir, celui de travailler avec d'autres parce que leur pratique résonne avec la nôtre ou bien la questionne, celui de sortir de son quotidien, etc. Il y a une envie de partage quitte à changer son point de vue par les apports de l'autre. C'est bien le renouvellement du regard et du point de vue que la mutualisation de savoirs suggère un processus de « déterritorialisation » pour reprendre l'idée de Deleuze et de Guattari (1972). En allant à la rencontre d'un autre, il est possible (si on s'en donne le temps) de se « déterritorialiser », « ce qui amène à découvrir de nouvelles façons de penser et de faire, mais aussi à détourner ses propres savoir-faire de leur contexte original. Ainsi, ils peuvent être libérés de contraintes ou d'aliénations inhérentes aux conservatismes habituels (Bienaise, 2016). Miailhe et al (2017) nous rappellent qu'il faut se garder d'isoler les parties du tout, de décontextualiser, de séparer les facteurs externes des facteurs internes, de limiter le nombre de dimensions interagissant, de considérer les événements intercurrents comme des anomalies. Oui, mais cela nécessite du temps et des moyens. Ils citent un proverbe chinois qui est : « Celui qui sort les poissons hors de l'eau pour étudier leur nage produit des paradigmes de recherche caduques »...

Il est en effet un moment dans l'approfondissement de « l'appréhension confuse » que toute personne participant à cette étape de clarification aborde avec une certaine appréhension, celui de la compréhension, puis de l'interprétation de l'idée, car il s'agit, sans la déformer (?) de la rendre un peu plus intelligible, sinon de la rejeter. Or, interpréter n'est pas une mince affaire puisqu'il faut comprendre en quoi la proposition peut conduire à invention à partir de ses propres représentations. D'ailleurs, on peut concevoir qu'il en existe plusieurs, les unes plutôt finalistes, les autres davantage causales, voire conceptuelles. Le point important à ce stade est qu'il s'agit « juste » d'aider à donner du corps à l'idée sans être amené à la justifier par des actions en profondeur, généralement interdisciplinaires. Mais, la pratique de cette clarification relève plutôt d'un bricolage savant, d'un métissage approximatif (relation d'aide réparatrice et constructive). « Le métissage s'oppose au logos. C'est l'art de la ruse, de l'intelligence pratique, des chemins de traverse. Les savoirs sont réappropriés, bricolés » (Foucart, 2008). Dans ce cadre, la notion d'heuristique de jugement (raccourcis cognitifs rapides de simplification d'une analyse ou d'une décision) permet une bonne efficacité dans des situations où la rapidité peut être déterminante (Bazerman et Moore, 2009).

Or Cramarégeas (2021) a écrit : « La créativité suppose une préparation, même inconsciente, un environnement culturel ou, si l'on préfère, un terrain que seul peut fournir un travail approfondi ». A ce stade, la maîtrise de l'incertitude ne peut pas être gérée par des étudiants, car des aspects plus complexes de la créativité et de l'invention, tels que la fiabilité des théories et de la qualité des informations, peuvent entrer en ligne de compte. Dans ce cas, des jugements personnels dépendant de compétences plus élevées seraient nécessaires et, par ailleurs, l'incertitude se situe au niveau méthodologique.

3.7. En dehors de l'invention ?

Un rapporteur de cet article a proposé aux auteurs d'aller un peu au-delà d'une élite qui aura pour vocation d'aider à la performance des productions industrielles dans le futur proche. Même si cette ouverture n'avait pas été considérée au moment où ce document a été écrit, la remarque a été trouvée très importante, ne serait-ce que parce que l'on ne développe de nouveaux dispositifs que si l'on dispose des personnels compétents, de machines adaptées, etc. pour bien produire. Dans le même temps, relativement à des formations de haut-niveau, ce rapporteur insiste sur l'apprentissage du doute (et son usage). Ces éléments sont susceptibles de conduire à des gouvernances revues permettant de meilleurs liens entre amont et l'aval, entre cols blancs et bleus.

3.7.1. La compétence par l'échange approfondi

Pour les ingénieurs-concepteurs issus de Grandes Ecoles d'Ingénieurs, ce qui a été montré, c'est que pendant leurs formations, les élèves subissent des apprentissages rapides, certes réducteurs, mais efficaces. Pour autant, une invention ou une innovation ne sont pas uniquement la mise en action d'une bonne idée : il faut atteindre la matière, ce qui conduit à l'intervention d'un ensemble de métiers avant d'arriver à une preuve de concept, voire d'un procédé industrialisé.

Pour aller à l'encontre du grand mythe contemporain de la proximité immédiate, du toujours « plus près de chez vous », de l'uniformité, des messages en 140 signes, de la cuisine « rapide » et standardisée que nous proposent les annonces publicitaires, il y a un bénéfice à trouver dans l'écart et dans la distance, à condition d'être en capacité de partager en confiance et de la manière la plus horizontale possible, des enrichissements mutuels pouvant voir le jour et qui, dans l'action pourront faire la différence (Jullien, 2014). Cette accélération est considérée par Rosa (2022) comme une « force totalitaire » dans la mesure où elle imprègne massivement les différents domaines de l'activité humaine. Sans doute que le « procès » intenté à la formation élitiste très spécialisée doit « ruisseler » vers d'autres activités sociétales de travail. Ce contexte renvoie alors à l'existence d'identités collectives en mouvement, à des différences qui se nourrissent de l'individualisme : les identités collectives nécessaires sont de plus en plus choisies, elles se développent par l'apport d'individus qui décident de les rejoindre – on décide personnellement (Wieviorka, 2014), mais provisoirement.

Considérons par exemple une équipe de sport collectif avec les meilleurs joueurs du monde, moins un joueur qui lui est de médiocre qualité. Si lui peut envisager de faire des progrès à titre personnel, il est peu probable que l'équipe puisse se trouver au plus haut de la hiérarchie sportive pendant longtemps. Ce constat illustre le fait que les mérites personnels et collectifs doivent faire l'objet d'une évaluation commune pour juger des interdépendances synergétiques. Michaud (2015) à ce stade considère que « la notion de mérite ne concerne pas uniquement la distribution des positions sociales, ainsi que des obligations et avantages qui leur sont associées, mais la qualité humaine en général. Elle a ce qu' [il] appelle une « épaisseur » particulière qui tient d'abord au fait qu'elle renvoie à quelques-uns des problèmes métaphysiques les plus difficiles, comme ceux de la liberté et ceux de l'égalité entre les agents humains ».

C'est vrai que les outils transforment le savoir, son accès de plus en plus aisé et rapide, mais... Dans le même temps, il est possible de penser qu'il n'est pas utile de charger sa mémoire et de fonctionner juste avec son bon sens (quand on en dispose !) et cela évite de gérer des interdépendances... Lorsque Montaigne a écrit sa phrase « Mieux vaut tête bien faite que tête bien pleine », seul l'écrit comptait pour accéder à l'information et il ne faut sans doute pas considérer qu'il ne s'agit que d'une approche philosophique ! Pour autant, aujourd'hui, ne serait-ce que par le fait qu'on peut poser nombre de questions via son portable, cette phrase pose question, finalement parce qu'en absence de culture générale ou scientifique, dans un monde binaire, on ne sait pas quelle question intelligente poser ! Cette situation, pour Durand et Gay (2023) constitue « un bouleversement fondamental dans la manière d'acquérir et d'accueillir le savoir et donc de faire société ».

Ingold (2018) propose de lutter contre l'idée de transmission, en renforçant une éducation qui doit être une ouverture aux choses et au monde, dans une capacité d'attention à l'environnement, à la résonance qu'étudie par exemple Hartmut Rosa (2020). Plusieurs auteurs reviennent sur la question de l'attention qui, comme Tim Ingold, défendent l'idée selon laquelle l'éducation ne consiste pas à remplir des têtes, mais à ouvrir les conditions de l'attention. Souvent réduite à la célèbre formule du « learning by doing » qui valorise l'expérience dans les stratégies éducatives prônée par J. Dewey (1938), ce travail par imprégnation est de plus en plus soutenu (cf. Arthuis, 2021 ; Faron et Duchêne, 2019 ; Déjoux, 2024 ; etc.). Les ponts entre les différentes formes d'éducation (sans oublier la formation continue), les recherches de base et/ou appliquées, leurs accomplissements, etc. doivent être impliqués dans les processus de progrès (au moins technologique).

Cependant, si l'on examine des chercheurs du monde académique, on peut être surpris par certains comportements... Par exemple, une équipe qui doit trouver des soutiens divers pour rester dans la compétition scientifique est constituée de professionnels ayant tous (ou presque) des profils et des qualifications très variés et ils doivent gagner ensemble, ce qui impose une organisation agile et efficiente (cf. syndrome du sport collectif). Pour avancer dans ce milieu, il faut disposer d'une sécurité psychologique dans un collectif de travail non sanctionnant, mais dans le cadre de relations interpersonnelles pouvant engendrer des risques pour l'image personnelle de chaque membre de l'organisation. Bourgeois et Mornata (2012) considèrent que, dans un tel environnement, chaque partenaire est confronté à des risques majeurs concernant son image et qui contraindraient son activité : « être perçu comme une personne ignorante, incompétente, négative (de par une réflexion particulièrement critique) ou comme perturbatrice ». Au contraire, croire que son environnement est indulgent, tolérant lors de ces prises de risques n'encourage pas des comportements facilitant l'activité scientifique, « tels que la recherche de feedbacks et d'aide en cas de difficulté, le partage d'informations, la discussion d'erreurs et l'expérimentation » (Bourgeois et Mornata, 2012).

Le fonctionnement « ordinaire » part du principe que tout problème organisationnel peut être résolu par une approche logique linéaire managée par le responsable du groupe. Conbere, Heorhiadi et Dobosenski (2021), considèrent qu'essayer de résoudre des problèmes complexes comme s'ils étaient simples relève de la pensée magique et que « les systèmes et les organisations complexes produisent des problèmes complexes qui sont nuancés et nécessitent une approche nuancée ainsi qu'un nouveau type de leadership ». Cette complexité se manifeste face à des défis adaptatifs qui sont des problèmes qui nécessitent un apprentissage renouvelé, de l'innovation et de nouveaux modèles de comportement bienveillants (tolérants). Les défis adaptatifs ne se prêtent pas à un management autoritaire ou à des procédures opérationnelles standard, mais nécessitent plutôt une exploration, de nouvelles découvertes et des ajustements.

La gouvernance, souvent oubliée dans de nombreuses formations constitue donc un élément critique qui doit permettre de « gagner ensemble » ! Se pose la question de l'actualité du concept de tolérance et des concepts associés et, naturellement de la nécessité de le repenser en fonction des réalités de notre monde complexe et instable avec des évolutions réglementaires qui laissent croire que l'on s'occupe de bien traiter les intolérances les plus criantes. Une posture empathique en recherche a pour vertu de sortir d'une culture de travail bidimensionnel dominée par la dialectique réductrice « Penser/Agir ». Cet aspect mécanique des systèmes organisés influence les relations et participe à l'émergence de tensions internes, bref de conflits peu profitables. Mais, en général, on ne traite pas les problèmes au fond, qu'il s'agisse de questions de société (socialement correct) ou du petit monde de la recherche et de l'invention : Liberté d'expression, influence des réseaux sociaux, multiculturalisme, management coopératif et bienveillant, sentiment d'efficacité personnelle, sentiment d'autonomie, buts personnels, image de soi, solidarités et empathie, etc. Les défis sont nombreux et, non exprimés en tant que tels, sont souvent cachés, subliminaux.

En invention ou en innovation, on n'échappe pas à des principes élitistes qui conduisent à des sélections importantes des personnels. Ce contexte d'intouchable ne crée pas naturellement de solidarités fortes entre ceux qui ne sont pas du même « côté du miroir », ceux qui ont accédé au statut de chercheur-concepteur, voire d'ingénieur ou de technicien, mais tous « titulaires » ou CDI ! Le ciment relationnel, indispensable, vient du travail intelligemment mené en commun (avec les réserves déjà faites) et donc à l'attractivité liée aux thèmes développés, mais surtout à la gouvernance bienveillante de la part des responsables de l'équipe de recherche, ruisselant sur l'ensemble des personnels. Non, une équipe de ce type n'est pas une PME sordide où le personnel est juste une facilité (au sens anglo-saxon), quasiment jetable, même si les apparences peuvent parfois le laisser croire quand l'exemple vient du haut de la hiérarchie !

3.7.2. Doute, partage et gouvernance

Le « train-train » quotidien laisse imaginer que ce qui se dessine pour demain sera, en continuité, à l'image de ce qui se passe au présent, d'où l'intérêt de la notion de promesse. Mais que valent ces promesses avec les intégrismes, les guerres proches de chez-nous, les risques pour la santé, l'environnement, la pauvreté, etc. ? Cette perception est classique, car les effets, en termes généraux de risque, sont rarement immédiats, ne sont pas toujours envisagés comme tels, et puis, ils sont noyés dans beaucoup d'autres et sont plutôt acceptés pour les autres... Les signaux correspondent à ce qui est recherché et résultent d'une hypothèse modélisante réductrice. On se situe donc généralement pour demain dans de la « prévision à l'identique ». C'est alors à partir de la prise en considération de la mesure de l'écart entre le prévu et le perçu, dans son approche sélective que les problèmes commencent avec, en conséquence, des crises et des rejets de la part de la société. Dans ce contexte, les reconstructions narratives du « storytelling » ont pour mission d'orienter les flux d'émotion pour créer des mythes collectifs convaincants de croyance permettant le (re)formatage des idéologies (déjà appliqué au marketing et à la politique).

La mission des professionnels de la science ne doit pas se limiter à la seule production de connaissances nouvelles et à la transmission des savoirs acquis. Elle s'inscrit dans les différentes chartes humanistes du fonctionnement de la recherche. L'impact social et économique des innovations scientifiques devrait conférer aux chercheurs la responsabilité collective de participer au nécessaire débat citoyen sur les enjeux et sur les priorités des politiques scientifiques et technologiques. Il s'agit de leur permettre de faire face à leur responsabilité sociale en, par exemple, élargissant leur formation initiale aux dimensions historiques, philosophiques, sociologiques et économiques de leur activité (or, certains ont déjà des difficultés à élargir simplement leur domaine de compétence disciplinaire).

Ce qui apparaît, c'est que pour les sciences de l'ingénieur ou de l'artificiel, les recherches sont plurielles et souvent récursives, se situant plutôt à l'interface avec d'autres domaines, allant de l'amont à l'aval ou de l'aval à l'amont, la responsabilité sociale associée n'a aucune raison de rentrer dans un processus monolithique bloquant ; s'il y a un centre (notre quotidien) et un « autour », cet « autour » doit faire partie d'une réflexion avant/pour/après l'action, visant une volonté de modifications culturelles et de pratiques des personnels des équipes de recherche et d'innovation. De même, les applications retenues de la science ne sont pas toujours univoques, il y a souvent ambivalence conduisant à progrès social et à des risques possibles pour les chercheurs, les citoyens et l'environnement. Dire que l'on est partenaire de cette analyse, c'est positionner les activités scientifiques dans un rôle effectivement responsable puisqu'il y a décision, même si la contribution des recherches est un tout petit élément d'un ensemble plus vaste dans lequel d'autres partenaires investissent... La question permanente est toujours de savoir où l'on place le curseur... C'est bien à ce stade que se situent la décision et la responsabilité (André, 2013).

Les commentaires présentés ci-dessus imposent donc à la recherche académique (mais pas uniquement) de tisser des liens sociaux autrement que par la simple juxtaposition d'opportunités ou de simples coopérations mécaniques et financières. S'il doit y avoir rupture culturelle, celle-ci doit faire l'objet d'une réflexion approfondie. En effet, il faut retrouver le raisonnement de Norbert Wiener (1997) « celui de l'ingénieur, dont le regard ne s'arrête pas aux faits matériels, mais s'étend jusqu'aux faits humains ». Ce qui est important, c'est quand il y a appropriation de l'objet à étudier, lorsqu'il y a coopération effective entre les différents partenaires associés au(x) concepteur(s)/inventeur(s) tout au long du processus de conception et pour partager les doutes, il devient difficile de déterminer précisément qui est responsable de quels effets pratiques, tant la réflexion des uns fait rebondir celle des autres (souvent à partir de détails vite oubliés).

Ces conditions de « pratiques démocratiques » avec des hiérarchies estompées impliquent des chercheurs et des praticiens dans un projet commun en offrant la garantie de principe d'une communication et d'échanges entre deux mondes qui, au mieux s'ignoreraient ou s'opposeraient, mais qui permettraient de faire l'hypothèse qu'elles rendront possible le dépassement de la question de la

transférabilité des connaissances qui est essentielle. Or, dans une bonne gestion d'un projet applicatif, la notion de transfert devrait être invalidée par le concept de co-construction de la connaissance entre les acteurs qui participent à un projet nouveau ! Dans ce cas, il serait utile de s'interroger sur les relations entre formes de connaissance au sein des dispositifs sociaux de délibération interdisciplinaires et de négociations face à des décisions dans l'incertain. En reliant des concepts et des méthodologies issues des sciences de la nature à des sciences de l'ingénieur et/ou du design, pourrions-nous ignorer aujourd'hui que ces éléments sont l'objet de multiples enchevêtrements (avec une centration sur les matériaux) ?

Cependant, les buts des sciences qui concernent l'étude des artefacts est de fournir un cadre épistémique adapté de représentation et de compréhension des phénomènes dans lesquels s'incarnent des intentions humaines et des régulations perçues comme naturelles (les sciences de la nature qui concourent à leur développement). Pour les scientifiques de la nature, la science peine à se vivre comme un lieu d'expression d'un véritable pluralisme. Peut-être que l'éthique, à savoir la recherche de « l'action bonne », n'est pas totalement compatible avec leurs visions des pratiques envisagées pour atteindre l'innovation industrielle, corpus de pensée autonome et cohérent, tournant factuellement le dos à la morale traditionnelle... Ici, nous sommes au fond à traiter du « faire pour savoir », plutôt qu'au « savoir pour faire ».

Il faut traiter des liens entre imagination et décision, des moyens de dominer la/les complexité(s), sans se faire piéger par les chants des sirènes numériques (sans pour autant les négliger). Chercheurs, nous avons à décider d'une démarche, dans un contexte incertain, en « jouant » sur le temps de la décision et celui de ses conséquences plus ou moins lointaines, privilégiant, plus ou moins l'efficacité ou l'approfondissement, l'holistique ou le local. L'invention est concernée par une épistémologie des sciences plurielles – de la nature et de l'artificiel - qui permet de dépasser l'impasse liée à l'aporie des critères de leurs démarcations. Or, ce transfert culturel depuis un monde de la recherche orienté vers l'offre, amène la science et la technologie à se déployer vers la demande, ou ce qui serait mieux, le besoin social.

Alors avoir la science avec soi, des objets ou mieux des systèmes à réaliser « physiquement », il n'y avait plus qu'à montrer que c'était faisable d'aller au-delà des savoirs stabilisés, au moins sur des exemples simples. C'est ce qui a été réalisé avec des étudiants ! Aujourd'hui les forces en termes de connaissances sont encore (et sans doute pour longtemps) du côté des sciences de la nature ; c'est l'aspect « sciences et technologies de la conception » qui a besoin d'être soutenu pour favoriser demain un métissage entre ces deux domaines qui ne connaissent pas encore leur complémentarité ou l'intégration de l'un dans l'autre (ou réciproquement). De fait, trois postures de recherche sont envisageables : celle du laboratoire (s'isoler du monde ou « laboratiser » ce monde), celle de la situation telle qu'elle se vit (la regarder sans s'impliquer) et celle des « recherches-action(s) » ou des projets applicatifs dans lesquels les disciplines scientifiques n'ont plus le complet monopole des bonnes questions, ni des bonnes actions... Ce dernier type d'attitude responsable introduit la participation active de tous les acteurs/contributeurs de la socio-économie, experts non scientifiques compris dans le processus de production de connaissance pour l'innovation.

Mais, il faut, en accord avec Tenzer (2008) sortir de l'illusion que « l'organisation spontanée des forces économiques et les initiatives individuelles des citoyens les plus talentueux constituent une base suffisante à la puissance d'un Etat ».

3.8. Une conclusion intermédiaire

Indépendamment de la formation des futurs ingénieurs, la conduite des projets de design, située entre définition du projet et son accomplissement, est complexe. On y mobilise de la connaissance pour faire et, en même temps, on produit de la connaissance, qui généralement n'est pas disciplinaire, mais plutôt thématique (Le Moigne, 2019). L'expertise interculturelle se développe, avec des difficultés classiques mais, selon sa complexité, traitables de langages, de perception, d'équilibre des débats

(dépendant des visions personnelles des acteurs présents). Alors, plusieurs considérations ou centres d'intérêts peuvent alors être à l'œuvre :

- « Pour les ingénieurs, contrairement aux scientifiques, le savoir n'est ni une fin en soi ni l'objectif central de leur métier. C'est plutôt... un moyen en vue d'une fin utilitaire... » ((Vincenti, 1990) ;
- Considérations disciplinaires : connaissances nouvelles, innovation, création de richesse, progrès technique, soins et médecine, bien-être technique, risques, toxicité, gestion des ressources ;
- Considérations éthiques et morales : prévention, éthique du vivant, préservation de la vie, solidarité intergénérationnelle, développement durable, effets sur le long terme ;
- Cadre de vie quotidien : bien-vivre ensemble, nuisances, pollution, hygiène, sécurité, santé, stress, conditions de vie, confort ;
- Cadre politique et social : priorité à l'emploi, contrôle social des décisions, civisme, démocratie, solidarité de voisinage (exemple de la gestion des déchets), contrôle « policier » et sécurité associée, terrorisme ;
- Considérations hiérarchiques (formelles ou langagières) conduisant à des formes de silence, même pour des personnes en désaccord avec les propositions de la majorité, celle qui s'exprime. Plusieurs raisons sont envisageables : vérification explicite des propos difficile, peur d'être ou de paraître incompetent, soumission à l'autorité,...
- Risques de réunions de mutualisation active transformées en réunion d'information descendante, réelle forme de storytelling inacceptable, évitant le vrai débat ouvert, débat qui par essence est lourd d'incertitudes...

Le satisficing/l'acceptable de Simon (1996) a pour but de fixer une solution satisfaisante et, de proche en proche, de fixer des standards permettant de déboucher sur des solutions raisonnables et améliorables par voie incrémentale. Il reste ainsi à élargir la quête à l'intérieur du domaine des sciences du design pour atteindre des solutions convaincantes parce que robustes. C'est la pratique qui est à l'origine de l'objet de recherche en établissant un pont entre trois champs : la discipline comme champ des savoirs, la théorie ou les concepts comme champ d'organisation des connaissances et la pratique comme champ d'application des savoirs. Il y a donc simultanément approfondissement scientifique, approches heuristiques, expertises diverses, pratiques, contexte social, voire un peu de bricolage, etc. Il est donc difficile, pour tous ces items de parler uniquement de science. Ces différents éléments font l'objet de la figure 4.

Rappelons que pour Simon (1996), l'objectif des sciences de l'artificiel est d'expliquer ce qu'est un artefact et comment il est conçu. Les principaux résultats sont les suivants :

- Des connaissances empiriques spécifiques sur la conception de l'objet (par exemple, des traces détaillées du processus de conception issu des sciences du design) ;
- Des concepts spécifiques, qui posent problème dans les sciences naturelles (par exemple, la fonction, l'intention, la conception, le concepteur, la créativité, la complexité de l'artefact, etc.) ;
- Des outils pour soutenir l'activité des concepteurs (par exemple, la conception assistée par ordinateur, les modèles de conception, les lignes directrices, les méthodes de créativité, etc.

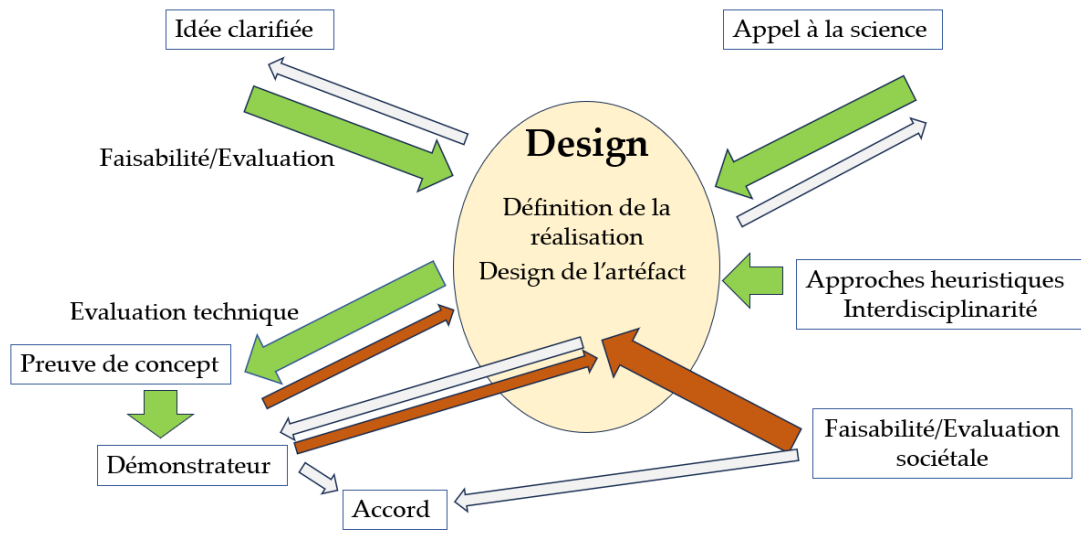


Figure 4. Le rôle central du design dans les sciences de l'artificiel (hors expertise, invention interne, « bricolage, etc.)

La figure 5 (Voigt, Niehaves et Becker, 2012) rassemble les différents éléments présentés ci-dessus, avant d'envisager d'examiner la place des sciences du design dans la production d'artéfacts et la possibilité d'aller plus loin avec des étudiants.

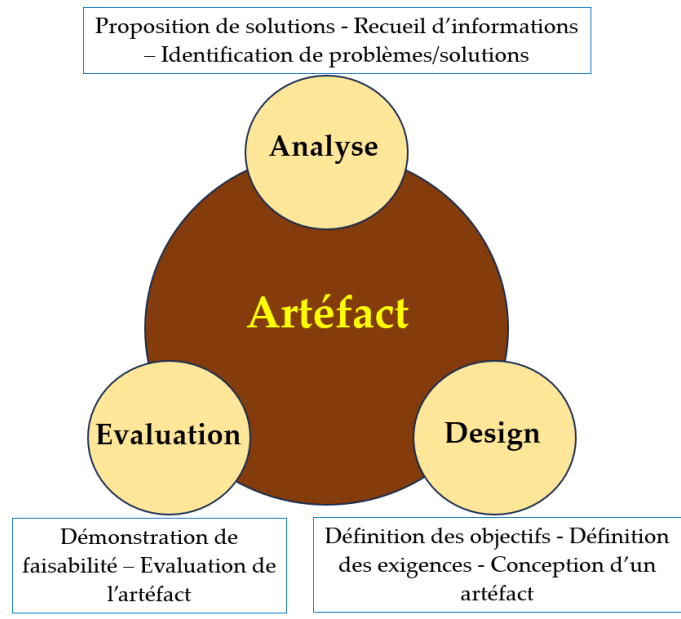


Figure 5. Eléments concernés dans la production d'un artéfact (Vision rationnelle/logique)

Dans des phases ultérieures liées à la concrétisation de l'idée, il est indispensable de disposer d'un regard compétent sur des sciences de la nature et des sciences de l'ingénieur. Comment, en effet, demander des approfondissements scientifiques sur certains domaines si l'on est incapable de préciser les demandes et de débattre des résultats (place du formateur ?). Les approches heuristiques qui doivent, dans des cas sortant d'évidences ou presque, utiliser des connaissances scientifiques dans le domaine de l'objet paraissent bien utiles, même si le résultat attendu relève des sciences de l'ingénieur et de la technologie ainsi que du design (cf. figure 1). Ce domaine critique utilise des savoirs experts et des connaissances scientifiques avant de conduire à la réalisation d'une preuve de concept, puis d'un prototype.

4. Nature et invention – Pour aller plus loin

Les commentaires émis au paragraphe précédent montrent que les processus d'invention passent par des idées impliquant la complexité dans des démarches interdisciplinaires diverses. Si ce constat n'est pas contestable, il est nécessaire de rester dans la culture de base d'une Ecole qui devra garder des noyaux de formation rationnels (certes qui vont être perturbés par l'IA générative) et par des stages pratiques. De ce fait, pour une approche rapide de la créativité et de l'inventivité, il paraît peu envisageable de tester ces éléments sur une création « tous azimuts » et des choix sectoriels peuvent avantageusement être retenus. Un domaine relié à la nature se prête bien à un jeu d'exploitation du biomimétisme (André, 2024) pour l'invention à l'intérieur des emplois du temps (chargés) des étudiants. Pour rappel, le biomimétisme est un domaine scientifique qui vise à exploiter, modéliser le comportement ou les propriétés des systèmes biologiques afin de les adapter à d'autres domaines scientifiques et/ou à l'innovation technologique. Le biomimétisme ne signifie pas « copier » l'existant naturel en ayant recours simplement à une analogie visuelle, mais consiste à rechercher des concepts organiques maîtrisés pour aller vers des applications technologiques.

Remarque : L'éthique biomimétique s'applique plutôt à la question de la manière dont nous produisons, utilisons et consommons les choses et, en tant que telle, elle peut potentiellement fournir le cadre éthique de base nécessaire pour étayer la transition vers une économie solaire circulaire et fondée sur la biotechnologie (Dicks, 2017). Ce domaine éloigné de l'action pédagogique n'est pas traité.

Selon Bachelard (1969), l'inventeur « ne peut prendre pour une pensée objective une pensée qu'il n'a pas personnellement objectivée ». Comprendre la particularité de la posture de chaque étudiant engagé dans un processus de découverte, qu'il soit disciplinaire ou interdisciplinaire, est ainsi fondamental pour comprendre le sens de son travail de traduction/synthèse ultérieur. Ce qui a été montré, c'est que les étudiants sont formés via des ensembles cohérents plus ou moins disciplinaires. La créativité faisant son œuvre, ces cadres de travail et de pensée doivent être mis à mal, avec le projet que de l'interdisciplinarité apparaisse et/ou de nouveaux cadres d'appropriation se déploient (cf. Pestre, 2004).

Dans ce jeu intellectuel utile, le biomimétisme est ainsi conçu comme une manière d'élaborer des techniques plus respectueuses de l'environnement en tentant d'imiter la nature. Mais qu'est-ce qu'imiter ? « Est-ce s'inscrire en continuité ou en discontinuité avec ce qui sert de modèle ? Le projet renvoie-t-il à un geste de domestication, d'appropriation, voire de fabrication du vivant, ou bien requiert-il une posture d'humilité de la part de celui qui imite ? » (Pitrou, Dalsuet et Hurand, 2015). Or, en observant le vivant, en examinant comment les organismes résolvent les problèmes que nous rencontrons et produisent des écosystèmes, nous pouvons dégager les principes qui devraient guider notre propre économie : diversité, localisation, optimisation, adaptation, résilience, et surtout coopération. Pour être au clair, on entend par « artificiel » ce qui est le produit de l'habileté humaine, et n'est pas fait par la nature : l'opposition du naturel et de l'artificiel, ainsi introduite, est représentative des conceptions dualistes de la nature ; dans l'exercice proposé on tente d'exploiter la nature pour envisager de l'artifice original. « Isoler une fonction ou chercher à résoudre un problème pratique émane d'un regard sur la nature et les systèmes vivants orienté par un projet technique sous-jacent, qu'il soit explicite ou potentiel. L'imitation ne consiste donc jamais en une simple opération : c'est un processus réitératif qui confronte et compare les différents systèmes » (Provost, Kamili et Pitrou, 2020).

La figure 6 présente dans le cas du biomimétisme le cadre général d'action avec, au départ une idée s'appuyant sur les sciences de la nature, prolongée par des aspects de sciences pour l'ingénieur. La poursuite de la réflexion exploite ensuite à cause d'approches heuristiques les sciences de l'artificiel et du design (avec des aspects non strictement scientifiques).

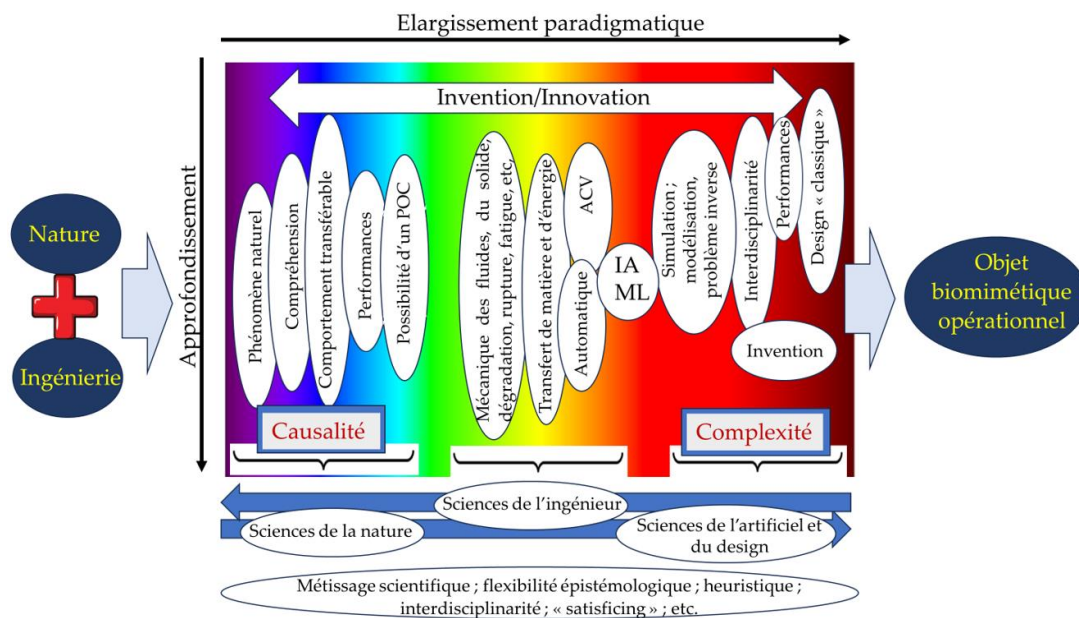


Figure 6. Alliances entre sciences de la nature, de l'ingénieur et de l'artificiel (IA : Intelligence Artificielle ; ML : Machine Learning)

Sas (2022) considère trois types d'imitations de la nature :

- Reproduction d'une forme observée, simple à mettre en pratique et correspondant à l'esprit de l'exercice. Ce niveau se concentre sur les caractéristiques physiques qui permettent souvent d'optimiser certains facteurs ;
- L'imitation des processus repose sur la fiabilité du résultat final : En se rapprochant de ce que la nature fait réellement il est possible d'inventer de nouveaux procédés (par exemple, remplacer une hélice par l'équivalent de ce fait la queue d'un dauphin). Ce niveau à plus fort potentiel implique de la part de l'étudiant des connaissances biologiques ;
- Ce niveau correspond à la simulation des (éco)systèmes : faire des produits et des processus qui implémentent (et auto-alimentent) un système plus large avec pour but de « restaurer » la Terre. Plus rarement mentionné, ce dernier niveau permet des applications plus organisationnelles et systémiques (Chapelle et al, 2020).

Dans l'approche considérée pour toute une promotion d'une Ecole, le but étant de montrer la possibilité d'être créatif même (et surtout) « à peu de frais », il est proposé de ne prendre en considération que le premier type. Le résultat d'un tel travail fait l'objet du projet d'article : « Le biomimétisme, une voie à explorer pour le génie des procédés ? ». Néanmoins, côté R et surtout R&D, la littérature « grise » fait mention du développement de procédés s'appuyant sur le deuxième niveau, résumé par Sas (2022) : cf. par exemple : remplacement des hélices (Bsmart, 2023) ; nouvelles hydroliennes (Tsiory, 2023) ; etc.

Dans ce type d'opération d'ouverture des esprits à des mondes inconnus pour la plupart des étudiants, il faut engager l'action par des aspects ludiques, mais qui peuvent se traduire par des constructions s'inspirant de la nature qui pourraient pouvoir être développées techniquement comme on le montre dans l'article « Le biomimétisme, une voie à explorer pour le génie des procédés ? ». Sur la base de la réussite de ce type d'opération pédagogique, d'autres projets peuvent émerger comme des approfondissements permettant d'atteindre le niveau 2 présenté par Sas ou s'engager dans d'autres interactions interdisciplinaires comme l'impression 4D (Demoly et André, 2022), la conception générative (Comminge, 2023), etc. L'objet de cette opération est d'engager les étudiants dans une démarche où l'on apprend à apprendre et, dans une deuxième phase (cf. niveau 2 de Sas) d'approfondir les connaissances « exogènes » pour échanger valablement avec les spécialistes du domaine.

C'est à l'aune de cette réussite éducationnelle que l'on pourra envisager, en plus grand nombre, des innovations « bottom-up » qui pourraient satisfaire des besoins sociétaux, issues des Grandes Ecoles d'Ingénieurs.

Bibliographie

- Adams R., Evangelou D., English L., Figueiredo A.D., Mousoulides N., Pawley A.L., Schifellite C., Stevens R., Svinicki M., Trenor J.M., Wilson D.M. (2011) "Multiple Perspectives on Engaging Future Engineers" *Journal of Engineering Education*, 100, 48-88.
- Aghion P., Cohen E., David B., Gigout-Magiorani T. (2021) « Pour une nouvelle politique industrielle après le Covid-19 » <https://legrandcontinent.eu/fr/2021/06/04/pour-une-nouvelle-politique-industrielle-apres-le-covid-19/>
- Ahmed N., Wahed M., Thompson N.C. (2023) "The growing influence of industry in AI research - Industry is gaining control over the technology's future" *Science*, 379, 884-88.
- Alapetite M. (2014) « Ouverture » 13-16 in Delion P. « Créativité et inventivité en institution » Erès Ed. – Paris.
- Alter N. (2010) « L'innovation ordinaire » PUF Ed. – Paris.
- Alturki A., Bandara W., Gable G.G. (2012) "Design Science Research and the Core of Information Systems" 309-327 in Peffers K., Rothenberger M., Kuechler B. Ed. (2012) "Design Science Research in Information Systems - Advances in Theory and Practice" 7th International Conference, DESRIST 2012 - Las Vegas, USA, May 14-15, 2012 Proceedings.
- Ancori B. (2014) « Communication, cognition et créativité dans les sociétés de la connaissance - A propos de deux dilemmes » *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 9, 45-93.
- André J.C. (2013) "Towards a Socially Responsible Research (SRR) charter in Engineering Sciences at CNRS level" *International Journal of Techno-ethics* 4, 39-51.
- André J.C. (2018) « From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing - Volume 1: From the first concept to the present applications; Volume 2: Improvement of the present technologies and constraints; Volume 3: Breakdown innovations: Programmable matter; 4D Printing and Bio-Printing" ISTE/Wiley Ed. – London – UK.
- André J.C. (2023) "Knowledge production modes between science and applications" ISTE/Wiley Ed. London – UK (2023).
- André J.C. (2024) "Designing and innovating with biomimicry?" ISTE/Wiley Ed. London – UK.
- Arthuis J. (2021) « Euro App Mobility s'installe dans le paysage européen de l'apprentissage » <https://euroappmobility.eu/fr/article/bilan-2021-euro-app-mobility-sinstalle-dans-le-paysage-europeen-de-lapprentissage/>
- Augé M. (1992) « Non lieux, introduction à une anthropologie de la sur-modernité » Le Seuil Ed. – Paris.
- Avenier M.J. (2019) « Les Sciences de l'artificiel : une conceptualisation révolutionnaire de sciences fondamentales à parachever » *Projectics / Proyectica / Projectique*, 24, 43-56.
- Bachelard G. (1969) « La formation de l'esprit scientifique » Vrin Ed. - Paris.
- Battini P. (2015) « La problématique de l'innovation en France » *Vie & sciences de l'entreprise*, 200, 119-141.
- Bazerman M.H., Moore D.A. (2009) "Introduction to managerial decision making" 1-10 in Bazerman M.H., Moore D.A. "Judgment in managerial decision making" Wiley Ed. – New-York – USA.
- Besnier J.M., Perriault J. (2013) « Introduction générale » 13-15 in « Interdisciplinarité : entre disciplines et indiscipline » Hermès, 67, CNRS Editions – Paris.
- Bienaise J. (2016) « D'une interdisciplinarité-processus à une interdisciplinarité-œuvre » *L'Annuaire théâtral*, 60, 91-103.
- Blanquart O., Malmaison P., Soulier E. (2006) « Le storytelling : concepts, outils et applications » Hermès Ed. - Paris.
- B-smart (2023) « Biomimétisme : une solution inspirée de la nage des dauphins » <https://www.bsmart.fr/video/20981-smart-tech-partie-10-juillet-2023>
- Bourgeois E., Mornata C. (2012) « Apprendre et transmettre le travail » 33-51 in Bourgeois E., Durand M. Ed. « Apprendre au travail » PUF Ed. – Paris.
- Callon M., Lacoste A. (2011) « Défendre l'innovation responsable » *Debating Innovation*, 1, 5-18.

- Canguilhem G. (1957) « La formation du concept de réflexe aux XVIIe et XVIIIe siècles » Revue de Métaphysique et de Morale, 62, 99-101.
- Carrier C., Gelinat S. (2011) « Créativité et Gestion - Les idées au service de l'innovation » Presses de l'Université du Québec Ed. – Québec – Canada.
- Castel R. (2003) « L'insécurité sociale » Seuil Ed. - Paris.
- CEFIC (2014) “Evolution of competitiveness in the European chemical industry: historical trends and future prospects” <http://www.cefic.org/Documents/RESOURCES/Reports-and-Brochure/Oxford-Study-2014.pdf>
- Chapelle G., Decoust M., Schuiten L., Van E.P., Hulot N., Pelt, J.M. (2020) « Le vivant comme modèle : Pour un biomimétisme radical » Albin Michel Ed. – Paris.
- Chemin-Bouzir C. (2019) « L’imaginaire : leurre générateur d’agressivité ou consistance génératrice de dynamiques sociales créatives ? Le cas de Conseils départementaux et d’associations d’aide à domicile » Revue internationale de psychosociologie et de gestion des comportements organisationnels, 60, 63-80.
- Chouvier B. (2017) « Groupalité et processus sublimatoire » 47-60 in Amado G., Bouilloud J.P., Lhuilier D., Ulmann A.L. « La créativité au travail » Erès Ed. – Paris.
- Christensen C., Dyer J., Gregersen H. (2013) « Le gène de l’innovateur : Cinq compétences qui font la différence » Pearson France Ed. - Montreuil-sous-Bois - France.
- Cina M. (2021) « L’imaginaire selon Castoriadis pour comprendre la créativité dans les organisations » Innovations, 66, 17-45.
- Citton Y. (2016) « Accélérer notre attention collective aux hyper-objets » 205-224 in L. de Sutter Ed. « Accélération ! » PUF Ed. – Paris.
- Collinet C., Terral P., Trabal P. (2014) « Le travail scientifique interdisciplinaire : réalités et contraintes » https://www.parisnanterre.fr/medias/fichier/rapport-trascinter-version-finale_1412093003347-pdf
- Comminge T. (2023) « Quels sont les logiciels de conception générative disponibles sur le marché ? » <https://www.3dnatives.com/logiciel-conception-generative-150620233/#!>
- Conbere J., Heorhiadi A., Dobosenski D. (2021) “Complexity, Magical Thinking and SEAM” 431-439 in Savall H., Zardet V. Ed. « Traité du management socio-économique » EMS Ed. – Paris.
- Coutellec L. (2009) « Biologies face à la modélisation et à l’interdisciplinarité » Natures Sciences Sociétés, 17, 73-75.
- Cowen T. (2011) “The great stagnation: how American are all the low-hanging fruit of modern history, Got sick and will (eventually) feel better” Dutton Ed. – New-York – USA.
- Cramarégeas F. (2021) « L’interdisciplinarité dans l’enseignement secondaire en France (1970-2018) : une légitimation contrariée dans les discours, les configurations institutionnelles et les pratiques enseignantes » Thèse de l’Université de Bordeaux - <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03483282/document>
- Cross N. (2007) “Designerly Ways of Knowing” Birhäuser Ed. – Berlin - Allemagne.
- Decorneille P. (2014) « Paul Bert, l’enseignement scientifique et la fabrique du citoyen » 129-140 in Wieviorka M. Ed. « La science en question(s) » Editions Sciences Humaines – Paris.
- Deleuze G., Guattari F. (1972) « Capitalisme et schizophrénie » Editions de Minuit – Paris.
- Demoly F., André J.C. (2022) “4D Printing: between disruptive research and industrial application” ISTE/Wiley Ed. - London – UK.
- Desjoux C. (2024) « Observatoire des transformations managériales » <https://www.fun-mooc.fr/fr/contributeurs/cecile-dejoux/>
- Dewey J. (1930) “Human Nature and Conduct” Modern Library Ed. - New-York - USA.
- Dewey J. (1938) “Experience and education” Collier Books Ed. - New-York – USA.
- Dias de Figueiredo A. (2014) « De la nature historique des pratiques d’ingénierie » Revue d'anthropologie des connaissances, 8, 245-278.
- Dicks (2017) “Environmental Ethics and Biomimetic Ethics: Nature as Object of Ethics and Nature as Source of Ethics” Journal of Agricultural Environment Ethics, 30, 255–274.
- Dortier J.F. (2015) « Innover...contre les idées reçues » Les Grands Dossiers des Sciences Humaines, 38, 1.
- Dosi G. (1982) “Technological Paradigms and Technological Trajectories : A Suggested Interpretation of the Determinant and Direction of Technological Change” Research Policy, 11, 147-162.

- Drew E. (2010) Symposium on opportunities and challenges in the emerging field of synthetic biology OECD and Royal Soc. Ed. <https://www.oecd.org/sti/biotech/45144066.pdf>
- Dubois M.J.F., Brault N. (2021) « Manuel d'épistémologie pour l'ingénieur » Editions Matériologiques – Paris.
- Durand B., Gay M. (2023) « La culture scientifique existe-t-elle ? » <https://www.contrepoints.org/2023/03/13/452280-la-culture-scientifique-existe-t-elle>
- Eloundou T., Manning S., Mishkin P., Rock D. (2023) “GPTs are GPTs: An Early Look at the Labor Market Impact Potential of Large Language Models” arXiv:2303.10130v4 - <https://arxiv.org/pdf/2303.10130.pdf>
- Enriquez E. (2017) « Groupe, leader bienveillant et créativité » 337-354 in Amado G., Bouilloud J.P., Lhuillier D., Ulmann A.L. « La créativité au travail » Erès Ed. – Paris.
- Faron O., Duchêne T. (2019) « Former » Editions de l'Aube - La Tour d'Aigues.
- Fayol H. (1901) « Séance de clôture congrès international des Mines et de la Métallurgie » Bulletin de la société de l'industrie minière, 759-766.
- Ferguson E.S. (1992) “Engineering and the Mind's Eye” The MIT Press Ed. – Cambridge – USA.
- Figueiredo A.D. (2014) « De la nature historique des pratiques d'ingénierie » Revue d'anthropologie des connaissances, 8, 245-278.
- Figueiredo A.D., Cunha P.R. (2007) “Action Research and Design in Information Systems : Two Faces of a Single Coin” 61-96 in Kock N. Ed. “Information Systems Action Research : An Applied View of Emerging Concepts and Methods” Springer Ed. – New-York – USA..
- Foucart J. (2008) « Travail social et construction scientifique » Pensée plurielle, 19, 95-103.
- Funtowicz S.O., Ravetz J.R. (2020) “The Knowledge Futures Commonplace - Science for the Post-Normal Age” <https://commonplace.knowledgefutures.org/pub/6qqfgms5/release/1>
- Funtowicz S.O., Ravetz J.R. (2020a) “Post-Normal Science: How Does It Resonate With the World of Today?” Science for Policy Handbook, 14-18.
- Gambier Y. (2019) « Traductologie et médias : les défis de l'interdisciplinarité » in Interdisciplinarity and Translation Studies - Syn-Thèses, 9-10, 11-24.
- Grabowski H. (2011) “The evolution of the pharmaceutical industry over the past 50 years: a personal reflection” Journal of the Economics Business 18, 161-176.
- Gras A. (2013) « Les imaginaires de l'innovation technique » Manucius Ed. – Paris.
- Gregor S., Hevner A.R. (2013) “Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact” MIS Quarterly, 37, 337-356.
- Guilford J.P. (1956) “The structure of intellect” Psychological Bulletin, 53, 267–293.
- GWI – Good Work Institute (2023) “Do Good Work” <https://goodworkinstitute.org/>
- Hall J., Watson W.H. (1970) “The effects of a normative intervention on group decision-making performance” Human Relations, 23, 299-317.
- Hodgkinson G.P., Starkey K. (2012) “Extending the foundations and reach of design science: Further reflections on the role of critical realism” British Journal of Management, 23, 605-610.
- Horenstein, M.N. (2002) “Design concepts for engineers” Prentice Hall Ed. - Upper Saddle River – USA.
- Industrial Commons (2023) “Work for the Common Good” <https://theindustrialcommons.org/>
- Ingold T. (2018) « L'anthropologie comme éducation » Presses universitaires de Rennes Ed. – Rennes.
- Ininou Y., Loilier T. (2021) « La sélection des idées incrémentales et radicales : Les enseignements d'une étude de cas » Innovations, 66, 139-175.
- Jankélévitch V. (1966) « La mauvaise conscience » Aubier-Montaigne Ed. – Paris.
- Jeantet M., Thiebeauld A. (2017) « Les missions de la branche AT/MP » Regards, 51, 33-49.
- Jullien F. (2014) « C'est l'écart qui fait l'autre » 145-149 in Frydman R., Flis-Trèves M. « L'Autre, le semblable, le différent... » PUF Ed. – Paris.
- Kuhn T. (1983) « La structure des révolutions scientifiques » Flammarion Ed. - Paris.
- Lavelle L. (1992) « De l'acte » Aubier Ed. – Paris.

- Layton E.T. (1976) “American Ideologies of Science and Engineering” *Technology and Culture*, 17, 688-701.
- Le Bas C. (2016) « Les inventeurs prolifiques comme déterminants des performances technologiques des firmes » *Innovations*, 50, 119-141.
- Le Moigne J.L. (2019) « To focus on processes, Les Sciences de l’artificiel, cinquante ans après : Essentielle contribution épistémologique et civique à la formation des Sciences de la Cognition et des Sciences d’Ingénierie » *Projectics / Proyectica / Projectique*, 24, 27-41.
- Leglu D. (2021) « La science post-normale, ou l’art de faire de la science en période de grande incertitude » https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/la-science-post-normale_157311
- Lévi-Strauss (1990) « La pensée sauvage » Pocket Ed. – Paris.
- Levy-Leboyer C. (2009) « La gestion des compétences » Editions d’Organisation - Paris.
- Lewin D. (1979) “On the Place of Design in Engineering” *Design Studies*, 1, 113-117.
- Messerschmitt D. (2000) “Understanding Networked Applications: A First Course” Morgan Kaufmann Publishers Ed. - San Francisco -USA.
- Meyer A.M., Helfert M., Donnellan B., Kenneallyplying J. (2012) “Design Science Research for Enterprise Architecture Business Value Assessments” 108-121 in Peffers K., Rothenberger M., Kuechler B. Ed. (2012) “Design Science Research in Information Systems - Advances in Theory and Practice” 7th International Conference, DESRIST 2012 - Las Vegas, USA, May 14-15, 2012 Proceedings.
- Mialhe D., Balas-Ezzemzami J., Combes J.M., Lojou-Julien C. (2017) « Penser la complexité, un étayage pour la pratique managériale » *Empan*, 107, 81-87.
- Michaud Y. (2015) « Le mérite une approche conceptuelle » *Revue française d'administration publique*, 153, 15-21.
- Millier P. (2016) « L’ingénieur, le bricoleur et l’innovateur » *Entreprendre & Innover*, 28, 48-62.
- Montagnon P., Braune E. (2023) « Peut-on encore parler d’intelligence humaine à l’heure de l’IA générative ? » https://www.forbes.fr/technologie/peut-on-encore-parler-dintelligence-humaine-a-lheure-de-lia-generative/?utm_source=welcoming&utm_medium=email&utm_campaign=newsletterWM
- Montaigne M. (de) (2009) « Essais » Pocket Ed. – Paris.
- Morton T. (2013) “Hyper-objects : Philosophy and Ecology after the End of the World” University of Minnesota Press Ed. – Minneapolis – USA..
- OECD (2023) “Driving Low-Carbon Innovations for Climate Neutrality” *OECD Science, Technology and Industry - Policy Papers No. 143* - <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/8e6ae16b-en.pdf?expires=1684677568&id=id&accname=guest&checksum=A4142D5784804923CCAC5D0D4358E505>
- Parmentier G., Paris T., Gandia R. (2021) « De la créativité à l’innovation : paradoxes, articulation et enjeux » *Innovations*, 66, 5-16.
- Pestre D. (2004) « L’évolution des champs de savoir, interdisciplinarité et noyaux durs. Communication au conseil scientifique du CNRS (14 janvier 2002) » *Natures Sciences Sociétés*, 12, 191-196.
- Pigasse M. (2014) « Eloge de l’anormalité » Plon Ed. – Paris.
- Pinker S. (2011) “The Better Angels of our Nature: The Decline of Violence in History and its Causes” Penguin Books Ed. – London - UK.
- Pitrou P., Dalsuet A., Hurand B. (2015) « « Modélisation, construction et imitation des processus vitaux. Approche pluridisciplinaire du biomimétisme » *Natures Sciences Sociétés*, 23, 380-388.
- Placzek M. (2023) “Smart Manufacturing and Materials II” *Applied Sciences*, https://www.mdpi.com/journal/applsci/special_issues/Smart_Manufacturing_Materials
- Reynaud J.D. (1989) « Les règles du jeu » Armand Colin Ed. - Paris.
- Rittel H., Webber M. (1973) “Dilemmas in a General Theory of Planning” *Policy Sciences*. 4, 155-169.
- Rosa H. (2020) « Rendre le monde indisponible » La Découverte Ed. – Paris.
- Rouquette M.L. (2007) « L’invention de l’invention » 5-19 in Rouquette M.L « La créativité » Presses Universitaires de France Ed. – Paris.
- Sas E. (2022) « La nature comme « modèle » : quels rapports aux vivants ? » <https://medium.com/luciole-design-et-non-humains/biomimetisme-la-nature-comme-modele-de79d9df2431>
- Schaer E., André J.C. (2020) “Process Engineering Renewal” ISTE/Wiley Ed. London – UK.

- Schmidt J.C. (2008) "Towards a philosophy of interdisciplinarity - An attempt to provide a classification and clarification" *Poiesis & Praxis*, 5, 53-69.
- Séris J.P. (2000) « L'artificiel et la connaissance de l'artificiel » in « Philosophies de la nature » Editions de la Sorbonne – Paris.
- Sevtsuk A., Chancey B., Basu R., Mazzarello M. (2022) "Spatial structure of workplace and communication between colleagues: A study of E-mail exchange and spatial relatedness on the MIT campus" *Social Networks*, 70, 295-305.
- Shaw M.E. (1932) "A comparison of individuals and small groups in the rational solution of complex problems" *American Journal of Psychology*, 44, 491-504.
- Silberzahn P. (2013) « Lean startup : le compagnon idéal de l'effectuation ? » *Entreprendre & Innover*, 19, 29-35.
- Simon H.A. (1996) "The Sciences of the Artificial" The MIT Press Ed. – Cambridge – USA.
- Studyrama (2021) « Les ingénieurs ... en chiffres ! » <https://grandes-ecoles.studyrama.com/ecoles-d-ingenieurs/choisir-son-ecole/les-criteres-pour-choisir/les-ingenieurs-en-chiffres-1658.html>
- Taylor F. (1909) "Why Manufacturers Dislike College Students?" *Proceedings of the 17th Annual Meetings of the Society for the Promotion of Engineering Education*, 17, 79-103.
- Tenzer N. (2008) « Quand la France disparaît du monde » Grasset Ed. - Paris.
- Thomas R., Basiosa V., Eiswirth M., Kruehl T., Rossler O.E. (2004) "Hyperchaos of arbitrary order generated by a single feedback circuit, and the emergence of chaotic walks" *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 14, 699.
- Tredgold T. (1828) Inscriptio dans la charte de 1828 de l'Institution [britannique] des ingénieurs civils selon Layton E.T. (1991) "A Historical Definition of Engineering" 60-79 in Durbin P.T. Ed. "Critical Perspectives on Nonacademic Science and Engineering" Lehigh University Press Ed. – Cranbury – USA.
- Tsiory L. (2023) « Lyon : un déploiement imminent pour les hydroliennes EEL Energy qui imitent les poissons » <https://www.neozone.org/innovation/deux-fois-plus-efficaces-quune-helice-le-deploiement-imminent-dhydroliennes-eel-energy-a-cote-de-lyon/>
- Varenne F (2022) « Comparer les modèles à l'aide du vecteur caractéristique : fonction, nature, principe et usage des modèles » *Natures Sciences Sociétés*, 30, 93-102.
- Vessier L. (2022) « Deux enquêtes dressent un portrait contrasté de l'état du doctorat en France » <https://themeta.news/les-deux-visages-du-doctorat/>
- Vincenti W.G. (1990) "What Engineers Know and How They Know It : Analytical Studies from Aeronautical History" The John Hopkins University Press Ed. – Baltimore – USA.
- Vinck D. (2014) « Pratiques d'ingénierie - Les savoirs de l'action » *Revue d'anthropologie des connaissances*, 8, 225-243.
- Virilio P. (2010) « L'administration de la peur » Textuel Ed. – Paris.
- Voigt M., Niehaves B., Beckerowards J. (2012) "Unified Design Theory for Creativity Support Systems" 152-173 in Peffers K., Rothenberger M., Kuechler B. Ed. (2012) "Design Science Research in Information Systems - Advances in Theory and Practice" 7th International Conference, DESRIST 2012 - Las Vegas, USA, May 14-15, 2012 Proceedings.
- Wang L., Xiong C., Hu J., Wang X., Qiu Z. (2018) "Sequential Multidisciplinary Design Optimization and Reliability Analysis under Interval Uncertainty" *Aerospace Sciences and Technology*, 80, 508-519.
- Wang L., Zhao X., Wu Z., Chen W. (2022) "Evidence Theory-Based Reliability Optimization for Cross-Scale Topological Structures with Global Stress, Local Displacement, and Micro-Manufacturing Constraints" *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65, 23.
- Wiener N. (2017) cité par Breton P. « L'utopie de la communication » La Découverte Ed. - Paris.
- Wiewiorka M. (2014) « L'autre, le semblable, le différent » 3-13 in Frydman R., Flis-Trèves M. « L'Autre, le semblable, le différent... » PUF Ed. – Paris.
- Williams R. (2002) "Retooling: A Historian Confronts Technological Change" MIT Press Ed. – Cambridge – USA.
- Wilson R.C., Guilford J.P., Christensen P.R. (1953) "The measurement of individual differences in originality" *Psychological Bulletin*, 50, 362-370.
- Wittgenstein L. (1953) "Philosophical Investigations" Macmillan Publishing Co. Inc. Ed. – New-York – USA.
- Yang Y., Song X., Li X., Chen Z., Zhou C., Zhou Q., Chen Y. (2018) "Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: From Materials to Functional Structures" *Advanced Materials*, 30, 1706539.

- Zeng Z., Wen M., Kang R. (2013) “Belief Reliability: A New Metrics for Products’ Reliability” Fuzzy Optimization Decision Making, 12, 15–27.
- Zhou S., Zhang J., Zhang Q., Huang Y., Wen M., (2022) “Uncertainty Theory-Based Structural Reliability Analysis and Design Optimization under Epistemic Uncertainty” Applied Sciences, 12, 2846.