

Ouvrage collectif

Société sobre et juste en 2050 : à quoi peut ressembler l'industrie de demain ?

Constats et propositions
pour l'enseignement
et la recherche



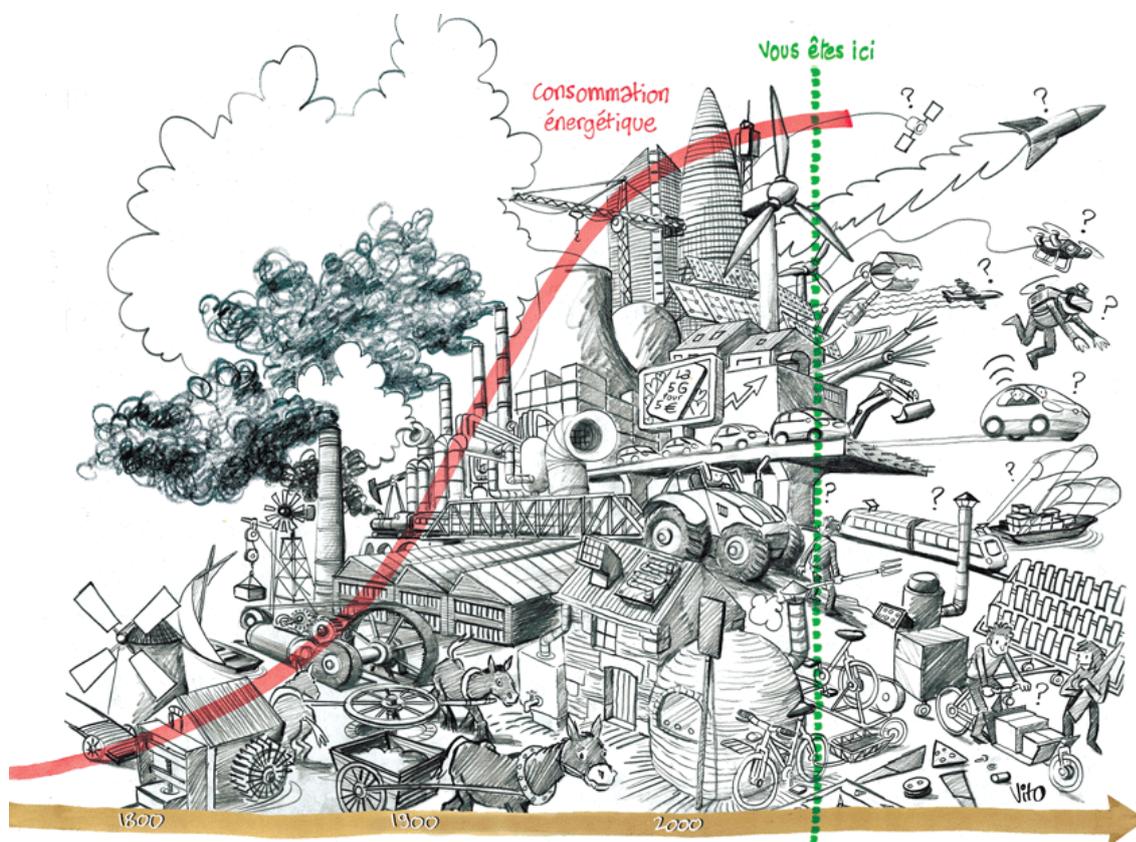
Smart»

Systems. Manufacturing. Academics. Resources. Technologies

Cahier du GIS S.mart

Société sobre et juste en 2050 :
à quoi peut ressembler l'industrie de demain ?
Constats et propositions pour l'enseignement et la recherche

(version 9 mai 2025)



Liste des contributeurs

Contributeurs initiaux :

Nabil ANWER | LURPA, Université Paris-Saclay / ENS Paris-Saclay
Yacine BAOUCH | Université de Technologie de Compiègne
Richard BEAREE | LISPEN, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Cyrille BRIAND | Université de Toulouse, LAAS-CNRS
Sébastien CAMPOCASO | COSMER, Université de Toulon
Hélène CHANAL | Institut Pascal, Clermont Auvergne INP
Romain COLON de CARVAJAL | INSA Lyon
Vincent CHEUTET | DISP, INSA Lyon
Pierre DAVID | G-SCOP, Grenoble INP Génie Industriel, UGA
Lou GRIMAL | I2M, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
William DERIGENT | CRAN, Université de Lorraine
Nathalie KLEMENT | LISPEN, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Florent LAROCHE | LS2N, Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes
Julien LE DUGOU | Roberval, Université de Technologie de Compiègne
Frédéric NOEL | G-SCOP Ecole Génie industriel, Grenoble INP, UGA
Olivia PENAS | Quartz, ISAE- Supméca
Camille PEDARRIOSSE | Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Romain PINQUIE | G-SCOP, Grenoble INP Génie Industriel
Tatiana REYES | I2M, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Lionel ROUCOULES | ISPEN, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Flore VALLET | Roberval, Université de Technologie de Compiègne

Ce document est évolutif et de nouveaux contributeurs et contributrices pourront être ajoutés.

Ce document a pour ambition d'être diffusé et discuté dans les écosystèmes ci-dessous :

- L'écosystème académique des Sciences de l'Ingénieur (SAGIP, Eco-SD, Manufacturing'21, AFM...), Sciences Humaines et Sociales, Sciences de Gestion, Sciences de l'éducation
- L'écosystème industriel (UIMM, Pôles de compétitivité, Clusters...)
- L'écosystème de la formation (rectorats, CFA, CTI, CPN IUT...)

Table des matières

Glossaire	4
1. Préambule	6
1.1. Les auteurs	7
1.2. A qui est destiné ce cahier ?	8
2. Des (r)évolutions industrielles à maîtriser dans un équilibre sociétal, social et planétaire à reconsidérer	8
2.1. L'évolution des activités industrielles vues par les académiques : impacts sociétaux, sociaux et environnementaux.....	9
3. La formation et la recherche académique : leurs évolutions en lien avec la situation industrielle	10
3.1. Evolution des industries et éthique des interactions humain – nature	10
3.1.1. Quelles définitions de "l'industrie", "des industries" et quelles évolutions ?	10
3.1.2. Industrie et éthique Humain / Nature.....	14
3.1.3. Perspectives.....	19
3.1.4. Références	19
3.2. Evolution des formations en « technologie »	20
3.2.1. Analyse étayée	20
3.2.2. Références	24
3.3. Influences réciproques du monde académique (de recherche scientifique et de la formation) et des politiques nationales en réponse aux besoins industriels et sociétaux.....	25
3.3.1. Influence liée à la dynamique et à la stratégie des formations pour l'accompagnement des générations (industrie et société).....	25
3.3.2. Des stratégies de mutualisation / regroupement relatives aux savoir-faire industriels	26
3.3.3. L'influence des agences de financement et d'évaluation de la recherche	26
3.4. Evolution des structures de valorisation de la recherche et de transfert vers l'industrie	28
3.4.1. Opinions.....	28
3.4.2. Analyse étayée	28
3.4.3. Prospectives	30
3.4.4. Références	30
3.5. Conclusion – Phase constats	30
4. Annexes	31

Glossaire

Société juste : société où à la fois les besoins humains essentiels des êtres humains sont assurés et les limites écologiques de la planète sont respectées. Ainsi une société juste permet de respecter les besoins des êtres humains à court (génération actuelle) et long terme (puisque la génération actuelle ne met pas en cause les conditions d'habitabilité des générations futures).

Régénérative : démarche visant à aller ne pas se cantonner à la réduction de la pression anthropogénique sur les systèmes naturels (forêts, océans, faune, flore, etc.). La priorité pour les sociétés humaines est de se situer en dessous de chaque seuil des limites planétaires, afin de ne pas exercer une pression trop forte sur les systèmes naturels et même de consacrer une partie des activités humaines à permettre leur renouvellement.

Sobre : souvent associée à la notion de privation, alors qu'elle fait appel à la notion plus vertueuse d'autolimitation, la sobriété est la recherche d'un équilibre entre la réponse à un besoin et les ressources disponibles pour y répondre. Une croissance illimitée dans un monde aux ressources limitées n'étant pas tenable, la sobriété permet de questionner la nature de nos besoins (essentiels ou superflus) et d'y répondre de façon juste.

Soutenable : se dit d'une trajectoire de société qui permet de répondre aux besoins des générations sans compromettre la capacité des générations à venir à répondre aux leurs. Les économistes ont défini la soutenabilité comme un regroupement de plusieurs capitaux - capitaux humains, naturels, physiques (industries par exemple) - et l'objectif est d'augmenter la somme de ces capitaux. De cette définition, deux visions différentes de la soutenabilité peuvent être mises en valeur : la "soutenabilité faible" dans laquelle les capitaux sont substituables les uns aux autres, c'est-à-dire que le capital physique peut permettre de pallier la perte de capital naturel. A l'inverse, la "soutenabilité forte" soutient l'idée que les capitaux ne sont pas substituables. Ainsi, si des forêts sont détruites, alors ce capital naturel ne peut pas être remplacé par un stock de capital humain ou technique.

Socio-technique : Tout objet technique est un ensemble d'interactions entre les éléments techniques qui le constituent (matérialité des systèmes techniques, procédés industriels, ...) et des éléments humains (réglementaires, institutionnels, valeurs, culturels, ...). La reconnaissance de ces interactions permet de sortir de l'idée de neutralité de la technique et de comprendre que les systèmes socio-techniques s'intègrent dans un tissu humain complexe. De même, les systèmes socio-techniques permettent de mettre en avant la co-évolution entre systèmes techniques et humains : les systèmes humains conçoivent des systèmes techniques et ces derniers façonnent et influencent nos sociétés.

Souveraineté : concept faisant référence à l'indépendance d'une entité (industrielle, nationale ou autres). Le concept de souveraineté industrielle pose la question d'interdépendance des systèmes industriels. Cette interdépendance a amené une montée en complexité du système industriel actuel, avec des chaînes de production mondialisées. Cette situation peut questionner la résilience du système industriel actuel et les conséquences de ces interdépendances.

Politique : Structuration d'un groupe social/d'une société que l'on retrouve dans les différents domaines de fonctionnement : éducation, culture, relations extérieures, économie, défense, etc.

Valeurs de l'industrie : Les valeurs morales ou les principes éthiques portés par une industrie pour se différencier de ses concurrents.

Système productif - Un système productif désigne l'ensemble des éléments et des processus impliqués dans la production de biens et de services. Il englobe les ressources humaines, naturelles, matérielles,

technologiques et organisationnelles nécessaires pour transformer des matières premières en produits finis ou pour fournir des services. Le système productif nécessite une science à l'interface voir intégrant des sciences humaines et sociales, sciences de l'ingénieur, sciences et technologies de l'information de la communication et sciences de la vie et de la terre [cahier prospectif ANR 2025]

1. Préambule

"Le techno-logue est celui qui discute, analyse la technique ... comme le socio-logue, le géo-logue, le climato-logue, le cardio-logue...". Aujourd'hui le technologue a le devoir de co-construire avec ses homologues. Car l'industrie et les technologies afférentes ont des impacts sur la société, les organisations, l'environnement... sur l'Homme et son existence".

Le *Cahier du GIS S.mart* propose une analyse critique de l'intégration de la technologie et des enjeux de l'évolution de l'industrie dans la formation et la recherche, en adoptant une approche critique et prospective. Plutôt qu'un simple état des lieux, ce document vise à porter un regard sur l'évolution de l'industrie, les usages technologiques actuels et futurs, en interrogeant leur pertinence, leurs impacts et leur finalité dans une société en mutation.

Pourquoi ce Cahier ?

L'ambition de ce cahier est double. D'une part, il propose une approche opérationnelle à horizon 2030, afin d'identifier des pistes d'action concrètes et immédiates. D'autre part, il s'inscrit dans une réflexion plus large, à l'horizon 2050, explorant les évolutions possibles de la formation et des défis de la recherche dans un monde où la technologie ne peut plus être pensée indépendamment des enjeux sociétaux, environnementaux et éthiques, ainsi que de la survenue de situations de crises.

L'un des constats majeurs est que l'intégration des technologies dans la formation et la recherche s'est souvent faite par opportunité, sans réflexion profonde sur la place et l'impact de ces technologies. Il faut aujourd'hui se poser la question du pourquoi et du comment. Trop souvent, la technologie est perçue comme une solution en soi, sans prise de recul sur ses effets réels sur les apprenants, les enseignants et la société dans son ensemble. Ce cahier vise donc à redonner du sens à cette intégration, en proposant une approche de l'industrie qui ne soit pas simplement technologique, mais holistique avec un objectif de développement des connaissances, d'acculturation et de mise en œuvre en vue d'une société sûre et juste.

Comment lire / contribuer ?

Dans un rôle de rédacteur ou de lecteur de ce "Cahier du GIS S.mart", chacun sera libre de se l'approprier :

- Tout rédacteur pourra enrichir son contenu en connaissant ses tenants et aboutissants,
- Tout lecteur pourra l'utiliser comme apport de connaissances et support d'influence, d'aide à la décision dans son écosystème.

L'analyse menée dans ce Cahier met en lumière plusieurs axes de réflexion essentiels. Tout d'abord, il est crucial de prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux des technologies dans notre société. À une époque où les critères environnementaux deviennent centraux, il est impératif de soutenir la transition vers une industrie responsable et citoyenne. Ensuite, la question de l'éthique et de la responsabilité revêt une importance primordiale dans les choix technologiques et la transformation de l'industrie pour les années à venir. Il ne s'agit plus seulement de transmettre des savoirs techniques, mais aussi d'apprendre à interroger ces savoirs, leurs finalités et leurs implications dans nos sociétés.

L'une des pistes explorées dans ce document est la transition d'une société industrielle vers une société régénérative et soutenable. Il n'est donc plus question pour les technologues d'être techno-solutionnistes mais d'ouvrir le progrès au service de la société. Si, pendant longtemps, l'innovation

technologique était vue comme un moteur de progrès économique, elle doit désormais être envisagée comme un levier pour construire une société plus équilibrée, prônant la techno- diversité, soucieuse de son environnement et du bien-être de ses membres.

Dans cette perspective, la formation doit évoluer pour intégrer ces nouveaux paradigmes et former des citoyens capables d'adopter une posture réflexive et critique face aux technologies et à l'évolution de l'industrie. Il ne s'agit plus de délivrer un savoir ancestral ou empirique que les livres et les outils d'IA savent/sauront apporter, mais il faut apprendre aux nouvelles générations à savoir apprendre. Avec l'augmentation des consciences sociales, les sciences doivent se repositionner, s'interroger sur l'éthique qu'elles portent ; il faut définir une nouvelle déontologie concomitante aux usagers, aux promoteurs, aux développeurs et aux fournisseurs de technologies.

Construire demain en décloisonnant les disciplines et les métiers !

Un autre aspect essentiel est la nécessaire articulation entre les sciences humaines et sociales (SHS) et les disciplines technologiques. Loin d'être opposées, ces approches doivent être complémentaires pour penser des solutions adaptées aux réalités humaines et sociétales. Ce cahier souligne ainsi l'importance de mieux intégrer les SHS dans les cursus scientifiques et techniques, afin d'assurer une formation plus complète et en phase avec les enjeux contemporains.

Enfin, ce document ne prétend pas établir un consensus, mais bien ouvrir le débat. Il se veut un outil de réflexion destiné aux chercheurs, formateurs, décideurs et acteurs du monde éducatif et industriel. En posant des questions appropriées et en proposant des pistes d'analyse, il aspire à éclairer les choix futurs et à favoriser une prise de décision éclairée quant aux mutations nécessaires de nos formations, des choix de recherches prioritaires, des enjeux politiques et des évolutions scientifiques impliquant de nouveaux usages des technologies.

Ainsi, le *Cahier du GIS S.mart* constitue une ressource précieuse pour quiconque s'interroge sur l'avenir de la formation à l'ère numérique et de l'industrie 4.0. Il invite à dépasser une vision technocentrée pour envisager un modèle scientifique et éducatif plus conscient, inclusif et soutenable, en accord avec les défis et répondant aux besoins des sociétés du XXI^e siècle.

Dans un second temps (au dernier trimestre 2025), un volet *Prospective* du Cahier aura pour objectif de construire des scénarios prospectifs avec des propositions et orientations facilitant la prise de décision sur l'évolution de la formation et de la recherche dans l'industrie, à une échéance de 40 ans

1.1. Les auteurs

Le travail présenté ici se fonde sur des réflexions collectives menées par des professionnels dont les activités quotidiennes sont liées de près ou de loin aux systèmes industriels. Il s'agit de **formateurs, chercheurs, industriels** qui analysent leurs pratiques et leurs potentielles évolutions en s'exprimant sur ce qui est nécessaire, d'après eux, pour garantir un avenir soutenable.

Ce collectif est **piloté par le GIS S.mart et fédère également d'autres parties prenantes qui ont soutenu et enrichi ce travail.**

Comme évoqué en préambule, il est essentiel que la communauté s'empare largement de ce cahier afin de l'enrichir. Il ne s'agit en aucun cas de viser un consensus, mais bien d'ouvrir les discussions et de préconiser des orientations nécessaires.

1.2. A qui est destiné ce cahier ?

Ce *Cahier du GIS S.mart* offre une vision académique sur la recherche scientifique et sur les formations relatives à l'évolution de l'industrie. Le public visé est donc multiple :

- **Les décideurs** des orientations des évolutions futures de l'industrie et des activités afférentes que sont : les orientations et les financements de la recherche scientifique qui permettront de maintenir à jour les connaissances et innovations (ANR, ANRT, BPI...), les grands plans d'investissement (SGPI...), la formation relative à la technologie et la formation des formateurs (DGESIP, HCERES, CGE, CTI, CPN IUT, France Université...)
- **Les académiques, scientifiques et/ou formateurs**, afin de faire évoluer ce cahier au fil de l'eau par des mécanismes collectifs de co-construction itérative. L'enjeu-clé est de recueillir de plus en plus de faits, de justifications et préconisations d'actions pour faire évoluer les pratiques pédagogiques dans les collèges, les lycées, l'enseignement supérieur.

Le citoyen - le grand public qui a besoin d'un éclairage afin de mieux comprendre l'apport et les impacts des technologies dans la société. L'enjeu est aussi de redonner confiance dans le rôle de l'industrie, des métiers et de la formation face aux enjeux actuels pour soutenir les transformations futures

2. Des (r)évolutions industrielles à maîtriser dans un équilibre sociétal, social et planétaire à reconsidérer

Depuis plusieurs centaines d'années, l'humanité a été témoin et acteur d'**une évolution de l'industrie** (i.e. l'activité industrielle) d'une ampleur et d'une complexité sans précédent - à la fois sur le plan organisationnel et technologique. Cette dynamique s'est amplifiée dans les années 1800 par la découverte des matières fossiles permettant d'avoir une énergie abondante à faible coût. Les systèmes de production sont consubstantiels de l'histoire humaine. L'évolution fondamentale du 18^e siècle est l'emprise du capitalisme naissant qui utilise l'outil industriel pour augmenter les richesses. Cette "révolution industrielle" et les évolutions qui ont suivi ont été marquées par **des avancées technologiques** utilisées dans de nombreux domaines : la santé, les télécommunications, l'énergie, la mobilité, l'éducation, l'industrie elle-même.... Une offre industrielle de produits et de services associés accrue, de plus en plus personnalisée, a vu le jour. L'intensification de la demande de consommation de ces technologies et des services afférents a piloté l'augmentation de la production à l'échelle internationale.

Définition de deux postures et visions de l'industrie

Ces évolutions ont conduit à **des mutations fortes au niveau sociétal** (transformation de l'emploi, transformation des métiers, augmentation des connaissances, temps libre, pouvoir d'achat, ...) et **social** (évolution des activités humaines, ouverture sur le monde...). Pour cela, les producteurs et les consommateurs ont puisé dans les ressources naturelles (eau, pétrole, minerais...) **ce qui a perturbé l'écosystème et les cycles naturels** (changement climatique, cycle biogéochimique de l'azote, érosion de la biodiversité...). Cette activité a creusé encore davantage les **inégalités sociales** : environ 50 % de la population mondiale n'a pas accès au minimum social : eau, éducation, liberté d'expression, etc.

L'activité industrielle actuelle fondée sur la croissance économique et l'innovation technologique n'a ainsi pas été sans conséquences. A partir des années 1970, la communauté scientifique, notamment au travers du rapport Meadows, s'est posée la question de la durabilité de nos modes de vie. En effet, celle-ci prend conscience des impacts du *American Way of Life* sur la biosphère et les enjeux de justice sociale associés. Le modèle, proposé par Rockstrom et Steffen, identifie des limites planétaires que l'humanité aurait dépassées. Ces points de bascule engendreraient des conséquences systémiques qui affecteraient la capacité d'habitabilité des humains sur notre planète. Les franchissements de ces

frontières n'ont pourtant pas conduit à un développement social satisfaisant comme mis en évidence par le modèle du Donut de Raworth. Les limites planétaires sont dépassées mais les planchers sociaux ne sont pas atteints.

En effet, l'activité industrielle, sans lien avec une volonté politique partagée, se substitue aux solutions sociales (techno-solutionnisme). Elle est donc impactée, et impacte à son tour **les éléments** économiques, sanitaires, politiques... engendrant des mutations industrielles et sociétales récurrentes. Par exemple, les crises pétrolières du 20^{ème} siècle ont démontré la vulnérabilité du système fondé sur les ressources fossiles. Les crises sanitaires et géopolitiques du 21^{ème} siècle ont montré la vulnérabilité du système socio-technique face aux défis d'approvisionnement des ressources, à la dépendance à certaines matières premières et à la perte de savoir-faire national.

Ces crises sont et seront de plus en plus fréquentes. Le monde industriel (et son activité) va vivre des bouleversements plus nombreux et plus intenses, portés par des phénomènes physico-bio-géo-chimiques et les évolutions intrinsèques de nos sociétés.

Nous devons participer à la construction de nouveaux modèles industriels afin d'accompagner les acteurs dans la transformation sociétale et industrielle. Cet accompagnement doit être fait en explicitant les choix sociétaux sous-jacents aux choix technologiques, en évaluant ces choix et (potentiellement) en proposant des réglementations. Pour cela, la communauté scientifique se doit de proposer des modèles robustes, soutenables et ancrés dans les territoires, garantissant un équilibre sociétal, social et économique à l'échelle planétaire.

2.1. L'évolution des activités industrielles vues par les académiques : impacts sociétaux, sociaux et environnementaux

Le rôle des scientifiques a toujours été de comprendre la nature, ses évolutions et ses impacts. Dans une recherche permanente d'optimisation, les activités industrielles ont alors subi des mutations nombreuses, parfois divergentes et contre productives pour la société ou l'écosystème planétaire. Ces évolutions sont actuellement discutées et décidées tant au niveau des politiques que des industriels eux-mêmes. Mais les éclairages publics argumentés par les **académiques** de ces communautés scientifique et pédagogique interdisciplinaires ont peu d'impact sur les politiques plurielles (étatique, universitaire, scientifique, socio-économique...), tant au niveau national qu'international.

Ces éclairages des scientifiques et pédagogues sur le sujet - produisant des questionnements et recommandations légitimes, éclairantes, utiles et guidantes pour la société - doivent être rendus encore plus visibles. On notera toutefois que les récentes prises de position des citoyens ont démontré une réelle complémentarité entre les chercheurs et les populations, avec une résultante de connaissances répondant de façon pragmatique aux besoins sociétaux. Cette richesse a été conduite par un processus scientifique éprouvé permettant d'observer, construire, structurer, valider et restituer les connaissances. Par le passé, les scientifiques occupaient une place reconnue dans la société : ils éclairaient les choix et les décisions, et étaient écoutés. Aujourd'hui, lesdits "sachants" doivent retrouver cette position. Que leurs contributions soient suivies ou non par les décideurs, leurs points de vue doivent être entendus, sans parti-pris idéologique, afin de **porter une voix collective sur le sujet de l'Industrie du Futur**.

Nos communautés académiques ont été sollicitées par le gouvernement en 2011 dans le cadre d'une réflexion prospective sur les systèmes de production du futur (cf. rapport de l'ARP FuturProd) pour, entre autres, faire émerger un nouveau comité scientifique à l'ANR (Industrie du Futur : Homme, technologie, organisations). Il est fondamental que ces réflexions soient mises à jour pour tracer les faits, les analyser et donner le point de vue académique sur les futures actions à mener **sur l'axe de la "recherche scientifique et technologique" et sur l'axe de la "formation technologique et des sciences de l'ingénieur" au collège, au lycée et dans l'enseignement supérieur.**

Une analogie peut aussi être faite avec les climatologues et leurs rapports (ex : GIEC) qui analysent les faits, les impacts des activités humaines sur le climat et les actions proposées (ex : scénarios de l'ADEME). Dans la même lignée, grâce à des récits désirables questionnant la place de la technologie, la communauté S-mart proposera plusieurs scénarios prospectifs afin de guider les grandes orientations de la recherche industrielle des 40 futures années (dernier trimestre 2025).

3. La formation et la recherche académique : leurs évolutions en lien avec la situation industrielle

A travers l'évolution des formations, de la recherche scientifique et technologique, les acteurs du monde académique ont souvent l'occasion d'exprimer des opinions sur les évolutions du système académique français et de son impact sur la situation industrielle et de son lien avec la société et l'environnement. Cette partie reprend un certain nombre d'opinions (qui pourront être enrichies au fil de l'eau) et apporte quelques éléments de référence (issus du monde académique, institutionnel ou industriel) venant les étayer. Ces éléments permettront de discuter les éléments de perspectives dans la partie IV.

Cette partie est divisée en quatre sections :

- L'analyse de(s) industrie(s) à travers des éléments de définition, de leur évolution au cours des âges, et de leurs interactions avec l'Humain et la nature
- La formation aux technologies dans une approche éducative globale (des "petites classes" à l'enseignement supérieur)
- La recherche académique relative à la compréhension des technologies, du système industriel, de ses interfaces organisationnelles, ses évolutions, son financement
- La valorisation de la recherche à travers la création de multiples structures et mécanismes incitatifs

3.1. Evolution des industries et éthique des interactions humain – nature

3.1.1. Quelles définitions de "l'industrie", "des industries" et quelles évolutions ?

"Nous avons étudié le monde ancien, la littérature, l'histoire et la philosophie de la Grèce ou de Rome. Nous sommes parfaitement initiés à l'histoire d'Alexandre et de César, aux faits et gestes de Caton l'ancien et de Denys le tyran, et nous pouvons dire le nombre de galères qui figuraient à la bataille de Salamine. Nous avons la valeur du sesterce romain, du talent et de la mine d'Egypte, de Corinthe et d'Athènes [...]. Mais la science est entrée, de nos jours, dans toutes les habitudes de la vie, comme dans les procédés de l'industrie et des arts.

- *Nous voyageons par la vapeur ;*
- *Tous les mécanismes de nos usines sont mus par la vapeur ;*
- *Nous correspondons au moyen d'un courant électrique ;*
- *Nous commandons notre portrait à la chimie ;*
- *Nous nous faisons éclairer par un gaz emprunté à la chimie ;*
- *C'est la chimie qui conserve nos légumes pour la saison de l'hiver ;*
- *Nous demandons à l'électricité de remplacer nos sonnettes ;*
- *...*

[...] Rechercher l'origine de chacune des principales inventions scientifiques modernes, raconter ses progrès et ses développements successifs, exposer son état actuel et les principes sur lesquels elle est fondée, [...] l'histoire des progrès de l'esprit humain dans la voie scientifique est aussi riche en intérêt, aussi féconde en enseignements qu'aucune autre partie de l'histoire générale."

[FIGUIER 1876] [FIGUIER 1896]

Analyse étayée

L'industrie désigne communément l'ensemble des activités économiques et humaines qui produisent des biens matériels à moyenne et grande échelle, généralement à l'aide de machines et de processus techniques. Elle englobe divers secteurs, tels que l'agroalimentaire, l'automobile, la chimie, et la construction, et joue un rôle crucial dans le développement économique des pays.

Depuis plus de deux siècles, l'évolution de l'industrie est communément décrite par quatre grandes révolutions. Elles sont chacune portées par des progrès technologiques marquants, des transitions énergétiques importantes et des mutations de société. Ainsi, à la fin du XIX^{ème} siècle, grâce au développement de la mécanique, celui des machines à vapeur (en particulier) et l'essor de l'exploitation du charbon pour la production d'énergie, une première révolution industrielle a lieu dans les industries textiles et métallurgiques qui marque le passage d'une société agricole à une société industrielle avec une production en (relativement) grande série de produits manufacturés [1]. Une deuxième révolution industrielle se produit un siècle plus tard dans le domaine de l'industrie du transport, avec l'avènement de l'énergie électrique, des moteurs à combustion et électriques et celui, concomitant, des moyens de transport, qui permettent le développement d'un commerce à l'échelle internationale [2]. Cette deuxième révolution s'accompagne par l'avènement de paradigmes de production marquants tels que celui de l'Organisation Scientifique du Travail, théorisée par Frederick Taylor [3], fondée sur l'économie du geste et du mouvement, que Henry Ford met en pratique dès 1914 par le travail à la chaîne et une organisation cadencée du travail en trois huit [4].

Ce sont les progrès de l'automatisation, de l'électronique, de l'informatique et des réseaux de communication qui sont les moteurs de la 3^{ème} révolution industrielle à la moitié du XX^{ème} siècle et qui permettent de concevoir des produits et des systèmes de production de plus en plus performants, de s'adapter à une demande fluctuante, de diversifier les produits tout en maintenant des faibles coûts de production. Au niveau organisationnel, on peut identifier une vision élargie des services supports qui deviennent une partie prenante à part entière de l'atelier productif.

L'industrie 4.0 repose sur les innovations de l'Internet des Objets, de l'intelligence artificielle (IA), des sciences des données, de la robotique, de la fabrication additive, ... qui autorisent une connexion et une automatisation accrue des systèmes de production. Ces technologies, une fois intégrées, permettent de transformer les chaînes de production en systèmes intelligents et autonomes, autorisant une production toujours plus agile et réactive, adaptée aux exigences de personnalisation et aux changements rapides du marché. L'organisation 4.0 se veut agile, horizontale, désilotée, avec des opérateurs qui évoluent vers des missions d'analyse, de pilotage et de synthèse des données.

L'industrie 5.0 est considérée comme une évolution de l'industrie 4.0, et elle complète cette dernière en y ajoutant des dimensions à notre sens fondamentales, axées sur l'humain et la planète [28]. Elle recadre les avancées technologiques promues par l'industrie 4.0 afin de tendre vers une industrie non seulement productive et efficace, mais également au service de l'humain, respectueuse de l'environnement et capable de faire face aux aléas. Ainsi, l'industrie 5.0 intègre une approche anthropocentrée, où le travailleur et son bien-être sont replacés au cœur du système de production. Selon cette perspective, l'opérateur n'est plus systématiquement évincé par la technologie mais plutôt secondé par des machines (tels les cobots) grâce à une interaction renforcée. L'industrie 5.0 exige de plus que l'industrie respecte les limites planétaires en développant par exemple des processus industriels moins impactants pour l'environnement et en adoptant les modèles de l'économie circulaire. Enfin, l'industrie 5.0 vise à doter les systèmes de production d'une plus grande robustesse et adaptabilité face aux perturbations et aux crises.

Les mutations industrielles, depuis l'apparition de la notion « d'industrie », ont été influencées par les facteurs technologiques, économiques, sociétaux et environnementaux ... La figure X montre quelques éléments de cette évolution laissant présager que le système industriel devra continuer à évoluer sous

l'influence de perturbations beaucoup plus fréquentes, qui ne sont pas toutes connues à ce jour (phénomènes physiques du changement climatique, ou de la biodiversité). Cela amène beaucoup d'incertitudes sur les situations futures de l'industrie et de son impact sur la société, la nature et l'environnement.

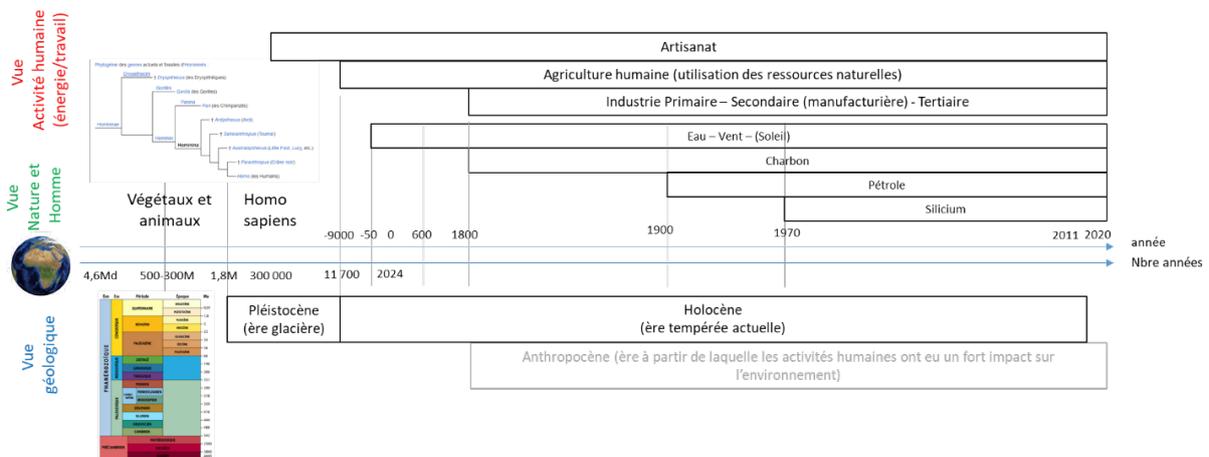


Figure 1 : Quelques éléments de l'évolution du système industriel, naturel et environnemental

Les innovations technologiques et organisationnelles (chaîne de montage type Ford, automatisation, informatisation, etc.) ont permis une augmentation de la productivité, une transformation des méthodes de fabrication, qui se sont accompagnées d'une croissance des biens de consommation et d'une évolution de nos modes de vie (urbanisation, mondialisation) impactant également le climat et la consommation de ressources naturelles.

Technologie et industrie : entre progrès et remise en question

L'industrie a longtemps été perçue comme un moteur essentiel du progrès économique et social. Toutefois, son développement s'est accompagné d'externalités négatives qui ont progressivement suscité une remise en question de son rôle et de son organisation. Cette critique s'est notamment développée à travers le prisme des idées réformistes et des analyses remettant en cause l'impact des technologies sur la société.

Depuis les débuts de l'humanité, les avancées technologiques ont été motivées par le besoin de répondre aux défis du quotidien. L'invention de l'agriculture a été stimulée par la nécessité de garantir une alimentation stable, tandis que la révolution industrielle a été propulsée par la volonté d'optimiser la production et d'améliorer les conditions de vie. De la roue à l'ordinateur, chaque grande innovation a trouvé son origine dans la volonté humaine de simplifier, sécuriser ou accélérer certaines activités essentielles. Ainsi, à travers l'histoire, c'est la nécessité de résoudre des problèmes concrets qui a constamment orienté le développement technologique.

Cependant, si les besoins humains ont historiquement été un moteur de l'innovation, l'émergence de nouvelles technologies a également engendré des besoins inédits. L'apparition du smartphone en est un exemple emblématique : initialement conçu pour améliorer la communication mobile, il a progressivement transformé notre mode de vie, créant de nouvelles attentes en matière de connectivité, de divertissement et de productivité. De nombreuses technologies modernes ont ainsi redéfini nos habitudes et désirs. Les réseaux sociaux, qui n'étaient pas un besoin intrinsèque, ont fini par s'imposer comme un élément central de la sociabilité contemporaine. En automatisant certaines tâches, l'intelligence artificielle a non seulement répondu à des exigences d'efficacité, mais a aussi développé de nouvelles dépendances aux systèmes intelligents. Ainsi, loin de se limiter à une simple réponse aux besoins existants, la technologie façonne et suscite de nouveaux désirs, redessinant en permanence les attentes sociétales.

Prospectives : Réinventer l'industrie, vers une innovation responsable

Ce double mouvement, où les besoins stimulent les développements technologiques tandis que la technologie crée de nouveaux besoins, soulève un paradoxe. Si l'innovation permet d'améliorer notre qualité de vie, elle alimente aussi une forme de dépendance aux outils qu'elle engendre. Cette course perpétuelle interroge sur la capacité de l'humain à rester maître des évolutions technologiques. En effet, loin d'être neutre, la relation entre les humains et les avancées technologiques est marquée par une tension entre progrès et risques. Si la technologie a été, à bien des égards, un levier d'émancipation et de confort, elle entraîne une consommation exacerbée et pose des enjeux éthiques et environnementaux majeurs. Il devient donc essentiel d'encadrer son développement pour que celle-ci reste un outil au service de l'humanité plutôt qu'un vecteur de nouvelles contraintes ou de dépendance.

Dans cette perspective, l'industrie ne doit pas être considérée comme une fin en soi, mais comme un outil au service de la société. Ivan Illich, dans son concept de convivialité, propose une vision où la technologie et les systèmes industriels sont conçus pour être accessibles, contrôlables par les individus et non aliénants. Cela implique une industrie qui favorise l'autonomie des communautés, plutôt qu'une logique d'hyper-développement technologique qui échappe au contrôle démocratique et social. En effet, l'industrie a traditionnellement été justifiée par sa capacité à répondre aux besoins de la société, notamment en matière de production de biens et de richesses. Cependant, cette approche productiviste a souvent omis d'anticiper les coûts sociétaux et environnementaux induits : pollution, exploitation des ressources, inégalités sociales, et dépendance aux technologies complexes. Maintenant que ces effets sont reconnus, des mécanismes correctifs sont petit-à-petit mis en place : par exemple réglementations, innovations technologiques pour réduire les impacts environnementaux, et développement de modèles à visée plus durable comme l'économie circulaire.

Il est donc impératif d'adopter une approche industrielle plus consciente et proactive. Plutôt que de développer des technologies pour compenser les effets négatifs d'un modèle non durable, il s'agit de concevoir des systèmes de production qui intègrent dès leur conception des principes de soutenabilité et d'équité. Cela passe par une redéfinition des finalités industrielles : répondre aux besoins réels des populations plutôt que de créer artificiellement des demandes, favoriser une économie locale et résiliente, et minimiser les coûts supportés par la collectivité. Ainsi, repenser l'industrie sous cet angle permettrait de dépasser les oppositions traditionnelles entre progrès technologique et critique sociale. Il s'agit désormais d'articuler développement industriel et responsabilité sociétale, en veillant à ce que les innovations servent véritablement l'intérêt général, sans générer de nouvelles dépendances ni externalités négatives évitables.

3.1.2. Industrie et éthique Humain / Nature

Dès la préhistoire, l'homme met en place des systèmes de production plus ou moins élaborés, qui impliquent des sites d'extraction de ressources, de production [25], des réseaux logistiques, voire des stratégies de troc qui s'apparentent à des transactions commerciales. Ces systèmes évoluent entre artisanat et mécanisation. L'accélération, la complexification des processus aussi bien technologiques que sociaux créent la première révolution industrielle. Dès cette première révolution, de nombreux penseurs se sont inquiétés des effets de l'activité industrielle et du consumérisme sur les équilibres fragiles de la planète. Le lien de causalité entre l'activité industrielle et le réchauffement climatique est aujourd'hui un fait scientifique avéré, cette activité industrielle étant même considérée comme une cause principale du dérèglement du climat (voir e.g. [16], [17] ou [18]). Des études scientifiques ont également prouvé que l'activité industrielle est une cause importante de l'épuisement des ressources naturelles (eau, minerais, énergies fossiles, bois), de la pollution de l'air, de l'eau, de la dégradation des sols, de la production de déchets dangereux et toxiques et des effets secondaires tels que les déséquilibres des écosystèmes, la baisse de la biodiversité, la détérioration de la santé animale (e.g., [19][20]).

Au-delà des effets délétères de l'activité industrielle actuelle, il est aussi important de comprendre que l'adaptation de nos pratiques n'est pas un choix vertueux mais bien une exigence qui s'impose à nous du fait de deux phénomènes conjugués, qui sont la raréfaction des sources d'énergie fossile et l'impact des émissions carbone sur le climat. En effet, sauf apparition de ressources miracles, les projections actuelles considèrent fortement probable une contraction du marché énergétique à horizon 2050. Une énergie plus rare et plus chère aura des conséquences lourdes sur l'industrie et la chaîne d'approvisionnement, aussi bien sur l'appareil productif que de logistique ou sur leurs coûts de maintenance. D'un autre côté, l'utilisation des combustibles fossiles est responsable de 85% des émissions de CO₂, principal gaz responsable du dérèglement climatique anthropique. Ces changements climatiques auront des effets désastreux sur la production de nourriture entraînant des famines, et pourraient rendre certains endroits du globe complètement inhabitables et provoquer de forts mouvements migratoires [26]. Le contrôle des émissions de gaz à effet de serre, condition par conséquent *sine qua none* pour la stabilité de l'espèce humaine sur terre, impactera de fait les activités industrielles, fortement émettrices de CO₂, en particulier l'industrie lourde [27].

Ce constat souligne l'importance d'adopter des pratiques industrielles plus durables, comme cela est prôné dans le paradigme de l'Industrie 5.0, telles que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le recyclage, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable et la transition vers une économie circulaire, afin de minimiser les déchets et préserver les ressources naturelles.

Dans ce contexte, le paradigme de l'économie dite du donut, développé par l'économiste Kate Raworth, semble particulièrement attractif [23]. Ce modèle prône la nécessité d'un profond renouvellement de la théorie économique et de l'élaboration des politiques. La priorité politique, toujours largement accordée à la croissance du produit intérieur brut (PIB), se veut en cohérence avec une vision économique qui cherche à transformer les économies, du niveau local au niveau mondial, afin qu'elles deviennent régénératives et distributives par leur conception même.

Le donut se compose de deux anneaux concentriques : l'anneau intérieur définit la satisfaction des besoins humains (en termes d'alimentation, de santé, de logement, d'éducation, de justice, d'équité, de travail) tandis que l'anneau extérieur définit un plafond écologique, pour s'assurer que la satisfaction des besoins n'induit pas un dépassement des limites planétaires et garantit la longévité des systèmes terrestres vitaux (biodiversité, climat, pollution, océan, forêt). Entre ces deux ensembles de limites se trouve un espace écologiquement sûr et socialement juste dans lequel l'ensemble de l'humanité a la possibilité de prospérer. Si l'industrie abandonne le modèle de l'économie libérale, consumériste, pour être au service de cette nouvelle économie, elle se trouverait profondément transformée dans la mesure où la production de biens et de services serait à présent centrée sur la satisfaction des besoins humains fondamentaux, seraient co-construits de façon coopérative, cela en garantissant un partage équitable des ressources entre les populations, et promouvant une économie circulaire, où les produits et matériaux sont recyclés et valorisés, facilement réparables, limitant ainsi l'impact sur les ressources primaires. L'innovation technologique deviendrait alors responsable pour servir les intérêts collectifs. Une industrie fondée sur l'économie du donut aurait en résumé les caractéristiques suivantes : (1) Priorité aux besoins fondamentaux ; (2) Réorientation vers une production régénérative ; (3) Innovation sociale et technologique (fondée sur des modèles coopératifs, partage et les déchets comme une ressource première territorialisée) ; (4) Justice sociale et inclusion (conditions de travail équitables, diversité et inclusion en pensant aux pays du Sud).

Certaines entreprises tentent d'intégrer cette économie du donut. Plusieurs exploitations agricoles se sont ainsi intéressées à l'agriculture régénérative préservant les sols, améliorant la biodiversité et réduisant l'utilisation de produits chimiques, tout en produisant des aliments de manière durable et en générant un profit suffisant [24]. Dans le textile, des marques de vêtements intègrent des matériaux durables, adoptent des conditions de travail équitables et se concentrent sur la réduction des déchets dans leur production (e.g. Patagonia). Des startups et entreprises high-tech se concentrent sur des innovations qui favorisent la durabilité, l'efficacité énergétique et la réduction des déchets (voir le Doughnut Economics Action Lab - DEAL).

Opinions

« L'industrie est pointée comme un système impactant fortement le climat. Il faut diminuer l'activité industrielle. C'est une option possible mais l'industrie et le climat doivent aussi être discutés en lien avec la société pour avoir une vision complète »

(Lionel Roucoules - Cour 2A, Obsodays 2024...)

Analyse étayée

Dans l'industrie 5.0, les progrès technologiques sont vus comme un moyen de promouvoir une industrie plus soutenable et respectueuse de la nature, sans remettre en cause toutefois le modèle économique libéral et le consumérisme. Il est certainement vertueux de s'intéresser à la soutenabilité de l'industrie mais cela suffira-t-il pour éviter les scénarios catastrophiques décrits par le Groupe d'experts intergouvernemental quant à l'évolution du climat (GIEC) [21] ou pour faire reculer le *Overshoot Day* (date à partir de laquelle l'humanité a consommé toutes les ressources naturelles que la Terre peut régénérer en une année), qui tombe en 2024 le 1^{er} août¹ et ne fait qu'avancer depuis les années 1970 ? Les technologies étant elles-mêmes gourmandes en ressources rares, une généralisation de l'Industrie 5.0 à échelle planétaire est-elle simplement soutenable ? Cette industrie ne risque-t-elle pas d'être réservée aux pays riches et produire encore plus d'inégalités entre les populations, voire de causer des conflits pour l'accès aux ressources ? En définitive, l'industrie et le

¹ <https://overshoot.footprintnetwork.org/>

modèle économique libéral sont fortement liés. Si bien que repenser l'un implique de repenser les fondements de l'autre. Dans quelles conditions une industrie pourrait être plus vertueuse en étant centrée sur les besoins de l'humain dans le respect de l'équité entre les Hommes et les équilibres naturels ? Albert Jacquard estimait déjà en 2006, dans son livre « Mon utopie » [22] que la Terre était capable de faire vivre l'ensemble de l'humanité, le véritable enjeu étant celui de répartir et gérer les ressources de façon concertée et équitable.

L'Industrie 4.0 et 5.0 demeurent centrées sur la prise en compte des changements rapides des caractéristiques du marché et la performance de la production sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Mais qu'est ce qui dicte les évolutions du marché ? Un élément principal est certainement la demande des consommateurs, elle-même grandement impactée par le consumérisme qui peut se définir comme la recherche constante de nouveaux produits ou services permettant de satisfaire des besoins plus ou moins essentiels de la population. Cette recherche est active au sens où les besoins peuvent être artificiellement contrôlés / orientés, grâce aux moyens de communication modernes (réseaux sociaux, publicités, influenceurs, médias), pour valoriser certains codes de réussite sociale, cela en fonction d'une classe sociale cible [14]. Les marchés répondent ensuite à ces besoins (qu'ils peuvent avoir eux-mêmes contribué à susciter) de la façon la plus profitable possible ce qui peut conduire à favoriser une obsolescence rapide des produits ou une externalisation de certaines phases de production synonyme de profits. Naturellement, plus les consommateurs adoptent un comportement consumériste, plus les entreprises innovent, augmentant la variété de choix. Cette abondance alimente encore davantage le consumérisme qui, en retour, tend à stimuler la production, la création d'emplois et la croissance économique, favorisant une augmentation du pouvoir d'achat, qui renforce le consumérisme cela sans limite, ce qui pose le problème de la soutenabilité de ce modèle [15].

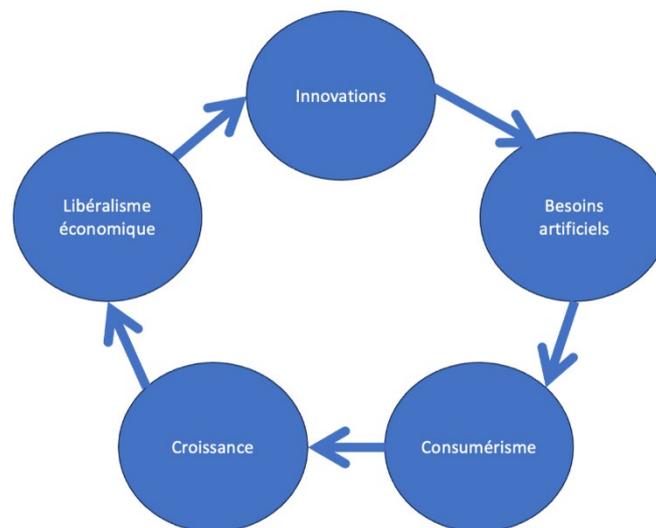


Figure 2 : Boucle de la croissance économique et la consommation

Les progrès technologiques, et les innovations qu'ils suscitent, sont souvent synonymes de progrès sociaux dans la croyance populaire. Cela est parfois indiscutable notamment dans les domaines de la santé, de l'accès à la culture ou encore de la compréhension du fonctionnement des écosystèmes terrestres. Mais qu'en est-il dans le domaine de l'industrie ? De nombreux penseurs se sont intéressés à cette question. L'un des premiers qui l'a abordée est Karl Marx qui présente la révolution industrielle comme un produit du capitalisme, affirmant que la technologie et l'innovation sont au service de la bourgeoisie et du capital pour maximiser les profits, et non au service du bien-être humain ou du progrès en soi [6]. Dans [7], David Landes analyse comment les avancées technologiques, telle que la machine à vapeur, ont été développées pour répondre aux besoins croissants de l'industrie et de l'économie de marché, davantage motivées par des logiques de rendement économique que par un

désir de progrès social. Joseph Schumpeter explique aussi que l'innovation et la technologie sont utilisées par les entreprises pour se démarquer et obtenir un avantage concurrentiel, dans une recherche du profit et de croissance permanente [8]. Lewis Mumford, dans son ouvrage "Le Mythe de la machine" [9], analyse les répercussions sociales et culturelles de la technologie et critique l'idée que le progrès technologique soit forcément un bienfait pour l'humanité, considérant que l'industrialisation a souvent mené à l'aliénation et à la déshumanisation et qu'elle n'a pas servi les intérêts de la population dans son ensemble.

Ces réflexions sont toujours d'actualité aujourd'hui avec de nombreux travaux de sociologues s'inscrivant clairement dans ce courant de pensée (voir par exemple [10][11][12]). Ceux-ci montrent que les progrès technologiques sont souvent mus par une volonté d'accroître les profits privés et les rendements financiers, plutôt que celle d'améliorer le bien-être public, cela alors que le secteur public est le principal investisseur dans les premières étapes des processus d'innovation. Cela renforce les inégalités sociales à l'échelle mondiale puisque, selon le rapport du World Inequality Lab [13], environ 1% de la population mondiale détient près de 45 à 50% des richesses mondiales, tandis que les 10% les plus riches détiennent environ 85% à 90% des richesses globales, une part significative étant issue de dynasties familiales d'industriels et d'entrepreneurs de première génération, dirigeants d'entreprises technologiques, financiers ou d'investisseurs.

Opinions

Plusieurs opinions ont été proposées dans cette partie 3.1.2.

- Notre perception occidentale contemporaine de la Nature, considérée comme un lieu où puiser des ressources, et notre perception de l'Homme comme indépendant de son environnement, nous ont conduit au dépassement des limites planétaires.
- Ce rapport de domination au reste du vivant et aux autres cultures est une construction sociale dans laquelle il nous faut reprendre conscience de nos interdépendances aux "services écosystémiques".
- Cette posture crée aujourd'hui une opposition entre ce que la sphère scientifique nous annonce (érosion de la biodiversité, dérèglement climatique, changement d'usage des sols, etc.) et des pratiques toujours plus émettrices en CO₂, et prédatrices des ressources.
- Afin de préserver l'habitabilité de la Terre, nos systèmes humains et notamment nos systèmes industriels doivent évoluer vers une reprise de conscience des interconnexions avec le reste du monde vivant pour sortir du paradigme de domination de la Nature et dépasser les approches techno-solutionnistes.
- La révolution à effectuer est donc aussi philosophique, sociétale et dépasse l'approche technique. En ce sens, l'éthique est un outil important pour accompagner ces changements de modèles.

Analyse étayée

Le dérèglement du système Terre nous pousse à repenser les rapports entre l'anthroposphère/technosphère (les humains, les technologies) et la biosphère. En effet, les activités humaines sont devenues une force géologique, capable de perturber les cycles naturels. Les activités humaines, notamment les systèmes de production, puisent dans la biosphère pour répondre à des besoins ou des envies issues des populations (humaines). Qu'est-ce que cela dit de nous ? Pour comprendre l'état actuel des choses, il faut remonter plus en amont comme nous l'avons développé au 3.1.1.

Aujourd'hui, la technosphère pèse autant que la biosphère et les perspectives sont insoutenables. Selon Jean-Baptiste Say (1828), « *les richesses naturelles sont inépuisables [...] ne pouvant être multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques* » [32].

Certains anthropologues, comme Philippe Descola [29], ont montré que la perte de lien entre la nature (biosphère) et la culture (anthroposphère) serait à l'origine de la destruction de la biosphère par les sociétés dites modernes (ontologie moderne). La philosophe Corinne Pelluchon [30] remonte au 17^{ème} siècle en occident, période de développement de l'idée que l'Homme serait d'une essence autre que la Nature. Elle explique que cette progressive séparation s'est accompagnée d'un mauvais usage de la raison, principalement réduite à sa dimension calculatoire. Cette dérive a entraîné un aveuglement face à nos dépendances vis-à-vis des autres vivants et face aux limites de notre environnement (ressources, climats etc). Il s'agit d'une raison amputée par son incapacité à penser les fins de ses actions, incapacité que Günther Anders [31] appelle le « Décalage Prométhéen ».

La difficulté à évaluer les conséquences de nos actes nous pousse à constater deux choses : d'une part le fait que les sciences et les technologies ne sont pas neutres puisque leurs fruits sont sources d'impacts sur la société et l'environnement. D'autre part, les sciences dites exactes ne nous éclairent pas sur l'encadrement de notre propre activité, par exemple sur l'usage de l'IA : parce que nous savons faire, devons-nous faire ? Pour sortir du rapport de domination à la Nature, il nous faut alimenter une pensée réflexive prenant en compte notre responsabilité vis-à-vis des autres vivants et des générations à venir.

Cette réflexivité nous amène également à nous questionner sur le contenu de la notion de progrès et sur le projet de société que nous souhaitons mettre en œuvre. Une activité industrielle éclairée pourrait ainsi permettre le développement de technologies et de recherches scientifiques, au service d'un projet d'émancipation individuel et collectif. Cette destruction est telle qu'elle met en danger l'habitabilité de la planète et notre capacité, en tant qu'espèce, à survivre sur le long terme. Ce danger a été formalisé, depuis une cinquantaine d'années, dans différents modèles scientifiques théoriques : mathématiques avec le modèle World 3, sciences du système Terre avec les frontières planétaires, etc.

Ces cadres théoriques, lorsqu'on tente de les appliquer à des systèmes industriels ou productifs peuvent paraître trop généraux. Cependant, il est possible de questionner l'éthique de nos modes de production, notamment avec les dynamiques de l'industrie 4.0. Dans les théories contemporaines de l'éthique, celle-ci se présente le plus souvent comme individuelle. Mais, face à notre capacité technique de transformer et de dégrader le monde, la réduction des scandales industriels à un simple manque d'éthique des individus est questionnable. Chaque acte, chaque décision, par l'amplification exponentielle de nos systèmes techniques, déborde nécessairement de la sphère individuelle vers une sphère socio-environnementale toujours plus large. Ce faisant, au-delà des postures morales liées à la liberté de l'individu, on comprend que l'éthique doit alors se construire comme un savoir pratique facilitant dans les situations de conflit de valeur la *“recherche déterminée, personnelle et collective, de la vie bonne, aujourd'hui et demain, dans des institutions justes, au service du lien social et écologique”* (Cécile Renouard).

Le décalage entre les dynamiques technocentrées et le besoin de relier à la fois les humains à leur milieu, et les humains entre eux, se cristallise dans la dissonance exprimée par les étudiants issus de grandes écoles. En effet, les élèves-ingénieurs, étudiants agronomes, économistes, remettent en question la perspective technoscientifique de leur formation, en questionnant la finalité de leur futur métier : *“Le fonctionnement actuel de nos sociétés modernes, fondé sur la croissance du PIB sans réelle considération des manques de cet indicateur, est responsable au premier chef des problèmes environnementaux et des crises sociales qui en découlent”*² ou encore *“en tant que travailleurs, nous affirmons donc dans ce manifeste notre détermination à changer un système économique en lequel nous ne croyons plus.”*³ Cette révolte étudiante pousse aujourd'hui les institutions de l'enseignement

² <https://manifeste.pour-un-reveil-ecologique.org/fr>

³ <https://manifeste.pour-un-reveil-ecologique.org/fr>

supérieur et de la recherche à transformer leurs offres de formation pour intégrer les enjeux socio-écologiques (cf. III.4).

3.1.3. Perspectives

Dans ce contexte tel que défini précédemment, deux voies semblent envisageables.

Soit l'industrie continue de servir les intérêts de l'économie libérale et devra alors accentuer sa capacité de résilience pour faire face : (1) d'une part, aux situations de crises internationales que l'accès à des ressources limitées, rares et convoitées, vont nécessairement créer et (2) d'autre part, aux conflits sociaux que les inégalités de richesses entre les individus et les populations vont générer. Cette première voie ne semble pas incompatible avec la mise en place de pratiques soutenables accompagnées par les innovations technologiques (économie circulaire, optimisation des ressources, utilisation d'énergies renouvelables, accroissement de la durabilité). Cependant, conservant le consumérisme comme moteur de croissance, on peut craindre que, si l'industrie devient plus efficace, il y ait des effets-rebonds tels que le gain d'efficacité serait annihilé par une augmentation de la consommation.

Une deuxième voie serait d'intégrer un modèle économique différent [23] abandonnant radicalement le modèle libéral, tel que celui du donut [23] ou de la décroissance durable [15], pour aller vers une industrie centrée sur la satisfaction des besoins essentiels de l'humanité. Là encore, les innovations technologiques évoquées auparavant seront précieuses pour porter ce nouveau modèle, notamment celles nécessaires à l'évaluation de la soutenabilité de la mise sur le marché d'un nouveau produit (ou service) vis-à-vis des besoins qu'il vient satisfaire, de son caractère éthique et de son empreinte écologique.

3.1.4. Références

- [1] Mokyr Joel, *The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress*, Oxford University Press, 1990
- [2] Chandler Alfred D., *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business*. Belknap Press of Harvard University Press, 1977
- [3] Taylor Frederick Winslow, *The Principles of Scientific Management*, Harper & Brothers, 1911
- [4] Ford Henry, *My Life and Work*, Garden City Publishing, 1922
- [5] Orsolin Klingenberg Cristina, Viana Borges Marco Antônio, do Vale Antunes José Antônio, *Industry 4.0: What makes it a revolution? A historical framework to understand the phenomenon*, *Technology in Society*, Volume 70, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102009>
- [6] Marx Karl, *Le Capital : Critique de l'économie politique. Livre I*, Éditions Sociales, 1972
- [7] Landes David S., *L'Europe technicienne : le rôle des machines dans le développement industriel*, Éditions Gallimard, 1975
- [8] Schumpeter Joseph A., *Capitalisme, socialisme et démocratie*, Payot, 2009
- [9] Mumford Lewis, *Le Mythe de la machine. Technique et développement humain*, Fayard, 1973
- [10] Callon Michel, Latour Bruno, *La science telle qu'elle se fait : anthologie de la sociologie des sciences de langue anglaise*, Éditions La Découverte, 1991
- [11] Aghion Philippe, Antonin Céline, Bunel Simon, *Le Pouvoir de la destruction créatrice : Innovation, croissance et avenir du capitalisme*, Éditions Odile Jacob, 2020
- [12] Mazzucato Mariana, *The Value of Everything: Making and Taking in the Global Economy*, Penguin Books, 2018
- [13] Chancel Lucas, Piketty Thomas, Saez Emmanuel, Zucman Gabriel, *Rapport sur les inégalités mondiales 2022*, World Inequality Lab, 2022
- [14] Ducourant Hélène, Perrin-Heredia Ana, *Sociologie de la consommation*, Armand Colin, 2019
- [15] Richter Katharina, *Less is More: How Degrowth will Save the World*, Jason Hickel, William Heinemann (2020), *Ecological Economics* 189, Article 107160, 2021

- [16] Etheridge et al., Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn, *Journal of Geophysical Research*, 1996
- [17] Schmidt et al., Atmospheric radiative forcing from anthropogenic and natural gases and aerosols: Advances since the IPCC AR4 report, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011
- [18] Marcott et al., Centennial-scale changes in the global carbon cycle during the last deglaciation", *Nature*, 2014
- [19] Steer Andrew, *Resource Depletion, Climate Change, and Economic Growth, Towards a Better Global Economy: Policy Implications for Citizens Worldwide in the 21st Century*, Oxford, 2014
- [20] Häder Donat P. et al., Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications, *Science of the Total Environment*, 2020
- [21] Shukla P. R. et al., *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 2023
- [22] Jacquard Albert, *Mon utopie*, Stock, 2006
- [23] Raworth Kate, *Meet the doughnut: the new economic model that could help end inequality*, *World Economic Forum*, 2017
- [24] Dudek Michał, Rosa Anna, *Regenerative Agriculture as a Sustainable System of Food Production: Concepts, Conditions, Perceptions and Initial Implementations in Poland, Czechia and Slovakia*, *Sustainability* 15, 2023
- [25] Clappier Anne-Marie, Marande Carine, Pelegrin Jacques, Chapuis Priscille, *Les silex de Vassieux-en-Vercors, de l'atelier de taille à l'enfouissement*, *Les nouvelles de l'archéologie*, 2018
- [26] Jancovici Jean-Marc, *Le Monde sans fin, miracle énergétique et dérive climatique*, Dargaud, 2021
- [27] Papon Pierre, *Climat, crises : Le plan de transformation de l'économie française*, Odile Jacob, 2022
- [28] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, European Commission, 2021
- [29] Descola Philippe, *Par-delà nature et culture*, Gallimard, 2015
- [30] Pelluchon Corinne, *Les Lumières à l'âge du vivant*, Seuil, 2021
- [31] Anders Günter, *L'obsolescence de l'Homme*, IVREA, 1956
- [32] Say Jean-Baptiste, *Cours complet d'économie politique pratique*, 1828-1829

3.2. Evolution des formations en « technologie »

3.2.1. Analyse étayée

Les savoir-faire, les compétences et connaissances techniques n'ont cessé de s'enrichir au cours de l'évolution de l'humanité. La capitalisation et la transmission de concepts, de méthodologies, de techniques de modélisation propres aux métiers techniques sont aujourd'hui mises en œuvre dans la discipline des sciences de l'ingénieur. Ces dernières années, cette discipline souffre de désaffection auprès des jeunes, à la fois dans l'enseignement primaire, secondaire et supérieur. Ce constat peut avoir des impacts, à long terme, négatifs sur la compréhension et la maîtrise des systèmes techniques très présents dans nos sociétés contemporaines. Ainsi, comme l'explique le paragraphe suivant, l'implication des élèves dans les filières d'ingénierie baisse alors qu'une demande forte existe en France ainsi que discuté dans le rapport "Quels métiers en 2030 ?" produit par France Stratégie et Dares⁴.

En 2023-2024, les études de la sous-direction des systèmes d'information et des études statistiques (SIES)⁵ montrent que les inscriptions dans une discipline générale scientifique repartent à la hausse (+ 1,5 %) après une année de baisse (- 2,8 % à la rentrée 2022 - après 7 années de hausses consécutives)

⁴ https://www.strategie.gouv.fr/files/files/Publications/2021%20SP/2022-03-10%20-%20Les%20métiers%20en%202030/fs-2022-pmq-rapport-mars_4.pdf

⁵ Note d'information du SIES, N° 2024-09, Décembre 2024

et que 174 000 étudiants suivent une formation d'ingénieur, dont 30 400 à l'université, effectif en baisse de 2,1 % par rapport à l'année 2022-2023. La diminution des effectifs est due à la forte baisse du nombre de nouveaux entrants en école d'ingénieurs. En effet, l'ouverture en 2024 de la troisième année de BUT a restreint le flux d'entrée en école d'ingénieurs qui existait après un DUT. De ce fait, le nombre d'étudiants diminue aussi bien à l'université que hors université (- 1,7 % et - 3,9 % respectivement). Néanmoins, malgré ces chiffres "encourageants" ou "rassurants" et au-delà de la question des effectifs, le sentiment partagé dans la communauté des enseignants en génie industriel et en sciences de l'ingénieur est que les savoirs et compétences propres à l'enseignement de STI (Sciences et technologies industrielles) ont été petit à petit "dilués" et appauvris, après la réforme des baccalauréats technologiques de 1992 qui a vu disparaître une partie des 12 options de la série "F" et celle de 2007 qui a conduit à une nouvelle évolution des baccalauréats de la série STI. Même si les technologies et les outils de production ont évolué, l'industrie manufacturière produit toujours du "copeau", met toujours en forme de la tôle ou coule encore du métal en fusion et il est donc surprenant que le nombre de machines-outils, de mise en forme ou d'équipements de fonderie et les heures de pratique associées aient été réduits dans les programmes d'enseignement des lycées techniques. Ces activités pratiques ont fait place à des activités de "simulation" et de production dans des fablabs qui, sans remettre en question leur intérêt, ne sont pas représentatifs de l'outil productif industriel auquel la nouvelle génération diplômée sera confrontée si elle choisit de faire carrière dans l'industrie. En amont du lycée, c'est aussi la construction d'une culture technique des élèves qui peut être questionnée au regard des contenus des programmes du collège et de l'école primaire, mais aussi et surtout des heures d'enseignement qui se sont peu à peu réduites. Même si le programme de technologie au collège a évolué en 2024 et préconise *"un enseignement qui prépare les élèves à relever les défis technologiques liés aux enjeux de société et de la transition écologique"*⁶, le fait que les heures de technologie en 6^e aient été supprimées à la rentrée 2023 a été un très mauvais signal. Comment comprendre cette suppression : on supprime des heures dans une discipline inutile et insignifiante ? Même si la baisse des inscriptions en écoles d'ingénieurs semble pouvoir s'expliquer par la durée plus longue du cursus en IUT (voir plus haut), il n'en demeure pas moins que de tels signaux envoyés aux élèves et à leurs familles mais aussi la réforme du baccalauréat général (votée en juillet 2018) et de l'accès au supérieur (Parcoursup) ne sont pas propices à ce que les filières en STI soient attractives et que les élèves s'engageant dans des formations d'ingénieur soient de plus en plus nombreux. Le graphique ci-dessous (Figure 3) illustre les effets de la réforme du baccalauréat mise en place en 2018-2019 sur les effectifs des classes préparatoires PTSI et TSI (classes préparatoires contenant un volume significatif d'enseignement consacré aux sciences de l'ingénieur).

⁶ https://www.education.gouv.fr/sites/default/files/ensel802_annexe.pdf

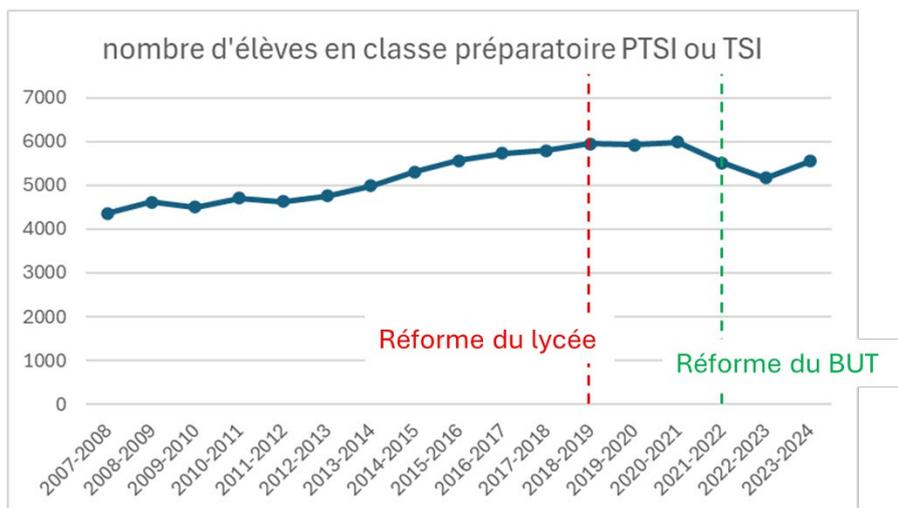


Figure 3. Evolution du nombre d'élèves en classe préparatoire PTSI ou TSI entre 2007 et 2024.⁷

Au-delà de la formation des élèves, c'est aussi la formation initiale et continue des enseignants et les concours de recrutement d'enseignants en sciences de l'ingénieur qui ont connu des réformes importantes. La mastérisation de la formation initiale des enseignants et les changements récurrents des modalités de formations et de format des concours ont initié une chute des inscriptions, qui par la suite a été renforcée par la crise des vocations (Figure 2)⁸.

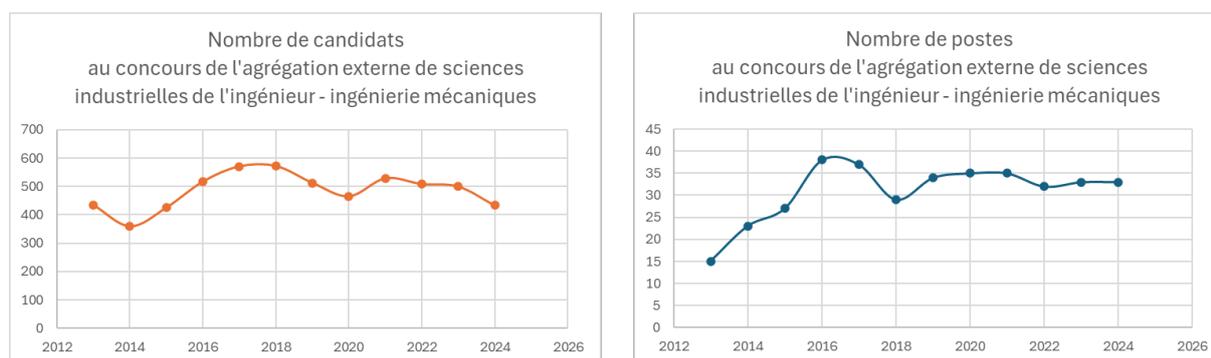


Figure 4. Évolution du nombre de candidats et de postes au concours de l'agrégation externe de sciences industrielles de l'ingénieur - ingénierie mécanique.⁹

L'analyse de la situation actuelle de la formation en technologie issue des diverses décisions politiques nous amène aujourd'hui à trois opinions présentées dans la suite de la section.

Opinion 1 : Absence de continuité dans la formation en technologie

Les établissements d'enseignement supérieur de l'univers S.mart, c'est-à-dire plutôt publiques et liées aux sciences industrielles, sont moins attractifs. Autrement dit, l'industrie ne fait plus rêver. Les effectifs d'étudiants diminuent et les SI disparaissent progressivement des formations primaires et secondaires. Les enseignants ne sont plus formés à ces thématiques. Cependant, les besoins industriels

⁷ Les données utilisées pour ce graphique sont issues de https://data.enseignementsup-recherche.gouv.fr/explore/dataset/fr-esr-effectifs-d-etudiants-inscrits-en-classes-preparatoires-aux-grandes-ecole/information/?disjunctive.annee_scolaire

⁸ <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2024-06/nf-sies-2024-15-33465.pdf>

⁹ Les données utilisées pour ce graphique sont issues de <https://www.devenirenseignant.gouv.fr/>

existent toujours, ainsi des entreprises ouvrent leurs propres écoles avec souvent des aides de l'État. Le risque avéré par le remplacement des formations de l'enseignement public par ces formations privées est un manque d'exhaustivité et de maturité sur le contenu dispensé car non basé sur un consensus national et l'avis croisé d'experts.

Le contenu actuel de la formation en technologie à l'école primaire et au collège peut aussi être discuté¹⁰. Cette formation est importante puisque c'est la première occasion pour beaucoup d'élèves de découvrir les bases des sciences de l'ingénieur. Si on analyse les objectifs des cycles 1, 2 et 3 (maternelle et primaire), le niveau d'exigence est assez faible et repose principalement sur de la découverte de systèmes et des projets très rudimentaires (le choix des matériaux n'est discuté qu'avec une vision très macro, les mécanismes classiques ne sont pas abordés, ni l'enjeu des technologies dans la société...). Cet état de fait peut s'expliquer par le manque de formation dans ces domaines des équipes pédagogiques. Ainsi, l'arrivée au collège se fait avec des compétences quasi inexistantes. La méthode pédagogique préconisée est la démarche d'investigation. Cette démarche limite l'approfondissement nécessaire sur les briques de base de la technologie, comme par exemple la production des différentes matières premières, les grandes familles de production énergétique... Ainsi, le contenu du cours de technologie est plus axé sur les méthodologies et les sens concrets des choses ont été perdus. Les élèves font ainsi des Analyses du Cycle de Vie sans savoir que le fer et l'aluminium sont deux matériaux différents. L'enseignement est alors basé énormément sur du conceptuel qui perd les élèves. Ceci nous amène à l'opinion n°2.

Opinion 2 : absence d'un ancrage technique pratique au profit d'une conceptualisation forte

Les étudiants, dans les formations aux sciences industrielles, ne font plus de « concret ». La simulation multiphysique a supplanté les travaux pratiques. Les composants technologiques ne sont que des boîtes noires manipulables dans des modèles informatiques.

Le fil conducteur plus méthodologique que technique se retrouve aussi dans le programme de la spécialité science de l'ingénieur au lycée. Le programme est basé sur l'affirmation de la démarche scientifique : "L'approche en sciences de l'ingénieur mobilise une démarche scientifique reposant sur l'observation, l'élaboration d'hypothèses, la modélisation, la simulation et l'expérimentation matérielle ou virtuelle ainsi que l'analyse critique des résultats obtenus. Il s'agit de comprendre et de décrire les phénomènes mis en œuvre et les lois de comportement associées pour qualifier et quantifier les performances du produit afin de vérifier si le besoin initialement défini est satisfait."¹¹ Ainsi, le contenu s'articule souvent sur l'idée d'alimenter un modèle multi-physique composé de boîtes avec des équations mathématiques représentant le comportement du composant technique. Les élèves peuvent ainsi aborder en 2h tout un panel de modélisation de composants techniques sans en comprendre leur utilité, leurs caractéristiques et leur fonctionnement.

Cet état de fait a été identifié par les instances de l'éducation nationale puisqu'une épreuve de travaux pratiques va être introduite dans les épreuves du baccalauréat général en sciences de l'ingénieur en 2025.¹² Mais nous pouvons nous inquiéter de la manière dont les enseignants vont pouvoir préparer cette nouvelle épreuve. Est-ce que les systèmes mis en œuvre et les activités menées seront représentatifs de la diversité des applications des sciences de l'ingénieur et analysés en profondeur ? Ou bien va-t-on rester sur une comparaison superficielle de résultats fournis par un modèle avec ceux fournis par une instrumentation ? De même, cette nouvelle épreuve ne règle pas la problématique de

¹⁰ <https://eduscol.education.fr/2308/technologie-au-college>

¹¹ <https://eduscol.education.fr/1646/programmes-et-ressources-en-sciences-de-l-ingenieur-voie-gt>

¹² <https://www.education.gouv.fr/bo/2024/Hebdo19/MENE2408179N>

la place des Travaux pratiques en technologie au collège. Il serait important de réintroduire des activités d'analyse et de formalisation du fonctionnement des mécanismes et des composants technologiques.

Opinion 3 : manque d'interdisciplinarité dans l'enseignement des sciences de l'ingénieur

Les notions associées aux enjeux de soutenabilité sont complexes et nécessitent de mobiliser des expertises de différents domaines. Les élèves et étudiants doivent y être confrontés pour en percevoir la dimension systémique. Toutefois, l'enseignement repose trop souvent sur des silos disciplinaires variant selon les spécialités et orientations choisies. Et la place dévolue aux sciences environnementales et aux sciences humaines et sociales dans les parcours de sciences industrielles reste marginale.

Au niveau de l'enseignement au collège, des réflexions ont été menées et des décisions ont été prises pour essayer de casser l'effet silo. Ainsi, par exemple, la notion de matériau est abordée en sciences physiques pour être réutilisée en technologie pour faire, entre autres, une analyse de cycle de vie. Cependant, l'exploitation du concept de matériau n'est pas la même en physique et en technologie. En physique, l'aspect "micro" va plutôt être intéressant pour aborder des propriétés de matériau comme la conductivité alors qu'en technologie un point de vue "pièce" est plus pertinent pour comprendre le comportement mécanique de la pièce, comprendre comment un matériau est mis en forme pour devenir une pièce. Ainsi, ne pas réintroduire le concept de matériau en technologie est selon nous une erreur, au contraire l'enseignement des matériaux doit être fait en cohérence dans les deux matières afin que les élèves comprennent la complémentarité des points de vue.

Est-il possible de mettre en pratique une Analyse du Cycle de Vie sans avoir une compréhension minimale des phénomènes à l'œuvre derrière les indicateurs manipulés ? La question du changement climatique semble être devenue commune mais les autres aspects environnementaux restent fortement méconnus : le principe de l'eutrophisation et des points de bascule associés, la définition de biodiversité... Les sciences environnementales sont peu, voire pas, enseignées dans le supérieur alors qu'elles permettent d'appréhender la complexité de la situation actuelle.

Lors de la dernière réforme du lycée, des cours d'enseignement scientifique ont été mis en place pour que tous aient un socle commun scientifique, mais pourquoi ne pas avoir aussi défini un socle commun vis-à-vis des disciplines des sciences humaines et sociales ? Éléments d'éthique, compréhension du système économique, comparaison approche systémique et cartésienne sont autant de notions indispensables à la prise en compte des enjeux de soutenabilité.

L'enseignement de la soutenabilité est difficile à intégrer dans les formations aux sciences industrielles. L'enseignement très disciplinaire, ou par silo, n'est pas compatible avec la prise en compte systémique de ces enjeux.

3.2.2. Références

[33] Pereira M., Bastien R., Prous S., Vibert C., Charneau A., Lapujoulade S., Leclair N., Cadi A., Kabla-Langlois I., Azulay R., Le métier d'ingénieur docteur, Think Tank Arts et Métiers, 2024

[34] Lemaire S., Que deviennent les bacheliers après leur baccalauréat ?, INSEE, 2004

[35] Henriot A., Rage M., Rolland M., Le bilan de la réforme de la voie technologique, rapport IGEN & IGAENR, Ministère de l'Éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, 2016

[36] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche, Les étudiants en formation dans l'enseignement supérieur, MESR-DGESIP/DGRI-SIES, 2022

[37] Dufourcq N., Désindustrialisation de la France : 1995-2015, Odile Jacob, 2023

3.3. Influences réciproques du monde académique (de recherche scientifique et de la formation) et des politiques nationales en réponse aux besoins industriels et sociétaux

Analyse étayée

Nous souhaitons aborder dans cette partie l'impact réciproque des politiques nationales, de la formation et de la recherche scientifique. Le paysage académique a, en effet, fortement changé durant les 40 dernières années, nous analyserons les déclencheurs de cette évolution et leurs impacts sur les feuilles de route scientifique et technologique mais également sur le financement de la recherche scientifique et de la formation en Sciences de l'Ingénieur et en Technologie. Ce dernier point apportera un complément à la section relative à la formation.

3.3.1. Influence liée à la dynamique et à la stratégie des formations pour l'accompagnement des générations (industrie et société)

La création des premières écoles d'ingénieurs à la fin du 18^{ème} siècle visait à accompagner la transformation industrielle de cette époque [38]. "Il fallait enfin constituer une nouvelle élite, capable de répondre aux défis qui se posaient au pays pour la fin du siècle, pour refaire de la France une nation riche, prospère et conquérante, un État capable de rivaliser avec son puissant voisin de l'est".

De nombreuses écoles furent fondées dans diverses disciplines. Parmi elles, on compte les actuelles écoles de commerce (HEC en 1881), d'ingénieurs (ENSTA en 1741, École Nationale d'Arts et Métiers en 1780, École des mines en 1783, Conservatoire national des arts et métiers en 1794, École Polytechnique en 1794, École Centrale des arts et manufactures en 1829, École supérieure d'électricité en 1894, Supaéro en 1909, et les écoles qui deviendront INP en 1970), ainsi que les écoles de formation des enseignants (École Normale Supérieure en 1794).

Ces écoles témoignent de la volonté de former une part de la société aux savoirs techniques (écoles "manufacturières") et de former des dirigeants capables d'impulser l'innovation et la production industrielle en croissance face aux autres puissances mondiales. Ces formations ont profondément influencé la société en créant la fonction d'ingénieur et de cadre supérieur, métiers considérés comme "nobles" mais servant également d'ascenseur social pour certaines populations.

Elles ont également soutenu une (re)construction industrielle qui s'est intensifiée après les deux guerres mondiales. Pour répondre au déficit d'ingénieurs, d'autres écoles furent créées (les INSA en 1956, les ENI dans les années 1960), complétées par les IUT (1966) et les BTS (1962) pour assurer "la jonction entre la conception et l'exécution des tâches" et former des cadres techniques¹³.

On observe également une utilisation stratégique des ressources locales dans la création d'écoles d'ingénieurs spécialisées pour soutenir des secteurs industriels spécifiques (Papeterie, Céramique, Textile, Optique, etc.).

Synthèse :

- A ses débuts, le développement du monde académique était guidé par les besoins du monde industriel et les compétences associées. Le progrès technique (technocentré) était valorisé comme levier du développement industriel et sociétal.
- Le développement actuel des formations doit, tout en préservant les métiers et savoirs industriels, intégrer de nouveaux enjeux sociétaux et environnementaux devenus

¹³ <https://enseignants.lumni.fr/fiche-media/00000000800/la-creation-des-instituts-universitaires-de-technologie-iut.html>

fondamentaux pour : 1/ développer l'industrie de demain, 2/ continuer à valoriser les métiers d'ingénieurs dans la société."

3.3.2. Des stratégies de mutualisation / regroupement relatives aux savoir-faire industriels

L'accélération des développements et de la performance industrielle et technologique (à partir des années 1960) a fait émerger un besoin de mutualisation permettant de renforcer et diffuser les savoir-faire techniques essentiels à nos industries et à leurs évolutions tout en rationalisant les investissements.

D'un point de vue industriel, diverses structures ont émergé pour répondre à ce besoin. Le CETIM "créé en 1965 à la demande des industriels de la mécanique a pour objectif d'apporter aux entreprises mécaniciennes des moyens et des compétences pour accroître leur compétitivité, participer à la normalisation et faire le lien entre la recherche scientifique et l'industrie"¹⁴. Sur ce modèle, de nombreux autres centres techniques industriels voient le jour (Ctdec (décolletage), CTIF (fonderie), etc.).

Parallèlement, dans le domaine académique, plusieurs organismes de recherche sont créés pour fédérer les efforts et mutualiser les moyens de recherche. Le CNRS (1939) pour « coordonner l'activité des laboratoires en vue de tirer un rendement plus élevé de la recherche scientifique ». L'ONERA (1946) figure parmi les premiers organismes visant à mutualiser les grands équipements nécessaires au développement aérospatial (ex. souffleries). Le CEA (1945) a permis de rassembler les travaux sur le nucléaire.

Cette même logique s'applique également aux formations de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. La création des réseaux AIP (1984) puis Primeca (1989) en est une illustration concrète. Ces réseaux ont pour objectif d'accompagner les transformations industrielles et technologiques (CAO, machines à commandes numériques, robotique, etc.) dans les formations de techniciens et d'ingénieurs, ainsi que dans la formation des enseignants et formateurs.

Synthèse :

- Dans cette dynamique, de nombreuses autres structures thématiques ont émergé : l'ADEPA (Production Automatisée), la SAGIP, l'AFIS, l'AFRV, etc. Toutes partagent le même objectif de rapprochement entre le monde académique et industriel.
- Cependant, la multiplication récente de nouvelles structures (instituts Carnot, IRT, Labex, Equipex, etc.) tend à brouiller la lisibilité du paysage de la recherche partenariale et de la formation, réduisant potentiellement leur efficacité globale. Cette prolifération soulève des questions sur la cohérence et l'articulation de l'ensemble du dispositif national de recherche et d'innovation.

3.3.3. L'influence des agences de financement et d'évaluation de la recherche

L'évolution et la multiplication des structures de financements (ANR, BPI...), initialement prévues pour rationaliser par la mutualisation (Labex, Equipex, Idex, ...), a malheureusement eu un effet contraire. Ces politiques de financements sur Appel à Projet, qui sont toujours d'actualité (PEPR, Equipex +, ...), sont pilotées par les grands organismes nationaux de recherche (CNRS, CEA, ...) et excluent de manière significative les structures et les chercheurs qui ne leur sont pas rattachés. Les chercheurs CNRS

¹⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_technique_des_industries_mécaniques

(environ 26000 ETP) représentent moins de 10% du nombre de chercheurs en France (333 000 ETP)¹⁵. Il est alors important que toute l'activité de recherche ne soit pas réalisée au sein du CNRS. Son pilotage doit donc être analysé en proportion. Ces organismes sont, en effet aujourd'hui, vus et utilisés comme des agences de moyens (via le pilotage des grands projets) et non pas réellement comme des structures de structuration et de pilotage de la recherche.

L'accélération des agences et sources de financements, dans une vision qui devient de plus en plus court termiste, a également révélé l'augmentation des agences d'évaluation (CTI, HCERES...) des structures d'Enseignement Supérieur et de Recherche. Les résultats des Appels à projets doivent être effectifs de plus en plus rapidement et doivent se baser sur des modèles économiques robustes.

Synthèse et opinions (à consolider certainement) :

Le travail d'analyse ci-dessus doit encore être largement consolidé pour enrichir la discussion et les analyses. Il en résulte néanmoins quelques opinions issues de la communauté. Ces opinions pourront être infirmées ou confirmées au cours des contributions futures à la rédaction de ce document.

- La stratégie de financement basée sur des mécanismes court termiste tend les établissements à être opportuniste pour utiliser ces financements comme des sources de financement récurrent au sein des laboratoires. Cela semble aller à l'encontre d'une recherche cumulative nationale. Exemple autour de l'IA : création de centres de mutualisation (cluster) mais avec des durées de vie limitées et basées sur des Appel à Projets.
- Les politiques nationales depuis environ 20 ans ont demandé aux établissements de l'ESR de se restructurer, en particulier autour de 2 objectifs : 1/la fédération d'établissements pour donner de la visibilité (PRES, COMUE, fusion...), 2/la responsabilité et les compétences des établissements (RCE). Une mise en concurrence est toutefois créée implicitement entre les organismes d'enseignement supérieur et de recherche aussi bien sur la formation que sur la recherche scientifique. Un autre exemple concerne les Appels à Projet Générique de l'ANR qui sont basés sur des évaluations par les pairs très bien mais qui génèrent néanmoins de la concurrence.
- Les appels (PEPRs, Instituts d'IA, etc.) poussent de plus en plus à des projets pluridisciplinaires, cela devient presque systématique, mais on aimerait parfois monter des projets entre experts sur un sujet spécifique, ce qui n'est presque plus possible aujourd'hui.
- La politique du contrôle (indicateurs, ZRR) crée beaucoup d'entropie au sein des établissements. Elle s'appuie très souvent sur des bilans quantitatifs (nombre de publications, de projets, de contrats...).

Prospectives :

- Retrouver un pilotage de la recherche dans une approche cumulative.
- Affirmer les modalités de recherche pour considérer la validation des avancées scientifiques. Il est important de redonner du poids à l'évaluation qualitative aussi bien au sein de la communauté scientifique que pour le transfert vers le monde industriel.
- Retrouver de l'efficacité face à la course aux indicateurs quantitatifs.

Références

[38] Grelon André, Les universités et la formation des ingénieurs en France (1870 - 1914), Formation Emploi N.27-28, 1989

¹⁵ https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/T497/les_moyens_humains_de_la_recherche_et_developpement/#:~:text=Cela%20correspond%20C3%A0%20496%20300,%20C9%20%25%20en%20un%20an

3.4. Evolution des structures de valorisation de la recherche et de transfert vers l'industrie

3.4.1. Opinions

Les trois opinions sur le paragraphe 3.4 sont :

- « Il y a trop de structures positionnées entre la recherche académique et l'industrie. » “couplé aux subventions” (livre des Mines)
- « Ces structures créent de la charge administrative pour les chercheurs et consomment des budgets importants pour leur seul fonctionnement qui manquent aux laboratoires. »
- « Les industriels ne savent pas à qui s'adresser et les interlocuteurs intermédiaires ne sont pas toujours au fait du savoir-faire et du fonctionnement académique. »

Définition de la valorisation de la recherche

Dans son rapport d'information [39], intitulé « La valorisation de la recherche dans les universités : une ambition nécessaire », Philippe Adnot propose une définition de la valorisation combinant trois aspects complémentaires.

1. La définition générale donnée par le Comité national d'évaluation (CNE) : « la valorisation correspond aux moyens de rendre utilisables ou commercialisables les résultats, les connaissances et les compétences de la recherche ».
2. La valorisation suppose une mise en relation du monde de la recherche et du monde socio-économique. Elle n'est pas un processus automatique : elle doit être organisée et faire l'objet d'actions concertées et réfléchies.
3. Le dernier élément concerne l'efficacité de l'action de l'Etat : la valorisation offre la possibilité de tirer le meilleur parti de l'engagement de l'Etat en faveur de la recherche en faisant en sorte que la société bénéficie des résultats de cette recherche.

Le transfert de la recherche vers l'industrie est une étape clé pour que la science participe activement aux transformations industrielles à venir.

Loi 2008 : L'innovation a été ajoutée aux missions des établissements ESR (Changement de nom du ministère MESRI).

3.4.2. Analyse étayée

Une brève histoire de la structuration de la recherche focalisée sur les actions favorisant la valorisation des résultats

Les premières grandes actions visant à développer la valorisation de la recherche française sont initiées par l'État après la seconde guerre mondiale, afin de combler le retard technologique et aider à reconstruire une industrie forte. Ces premières actions prennent la forme d'une (re)structuration et d'une fédération de la recherche par grandes thématiques ou enjeux stratégiques, notamment via la création d'organismes spécialisés, qui deviendront les actuels organismes nationaux de la recherche (ONR). L'ONERA et le CEA sont ainsi créés en 1946 afin d'accompagner et de structurer les recherches, respectivement dans le domaine aéronautique et dans le domaine de l'énergie nucléaire nouvellement découverte. En 1948, un cadre juridique est créé pour les centres techniques industriels, dont fait partie le CETIM lancé en 1965 sous la houlette de la Fédération des industries mécaniques. Le CNRS, créé en 1939, est quant à lui restructuré après-guerre afin de renforcer la recherche fondamentale.

Dès 1966, les premiers laboratoires communs (ancêtres des UMR) voient le jour entre les universités et le CNRS. En 1967, l'institut de recherche en informatique et automatique, ancêtre de l'INRIA, voit le jour. Cet institut a pour mission de créer un lien entre recherche publique et industrie, et de faire avancer des projets risqués et ambitieux en sciences et technologies du numérique. La même année, l'agence nationale de valorisation de la recherche (ANVAR) est fondée pour accompagner la valorisation des résultats de la recherche des organismes publics de recherche et des universités par le biais du transfert de technologie auprès de l'industrie. Suite à la création de l'agence ANVAR, de nombreux établissements de recherche public sont accompagnés afin de se doter de leur propre structure interne de valorisation de la recherche, généralement fondée sous le format d'association loi 1901 (SERAM). Il faut ensuite attendre la fin du XXème siècle, avec la loi Allègre de 1999, pour que l'ensemble des établissements publics à caractère scientifique se voient dotés d'un service d'activités industrielles et commerciales (SAIC).

Créés sur appel à projet en 2004, les pôles de compétitivité ont pour rôle de dynamiser, sur un territoire donné, les institutions et les entreprises partageant un secteur d'activité commun et des compétences complémentaires. Parmi les principales missions des pôles de compétitivité, on citera l'incitation à la recherche partenariale publique-privée sur son territoire et domaine d'influence. En 2005, l'Agence nationale de la recherche (ANR) est créée pour développer la recherche française sur projets, et pour stimuler l'innovation en favorisant l'émergence de projets collaboratifs pluridisciplinaires et en encourageant les collaborations publiques-privés (e.g. projets PRCE). Cette ambition d'encouragement à la recherche partenariale et à la valorisation des résultats de la recherche se concrétise dès 2006 avec la création du label Carnot. Les établissements et les structures de recherche labellisés (institut Carnot) sont valorisés par le biais d'un abondement géré par l'ANR et calculé en fonction du volume des recettes issues de leurs activités de recherche partenariale, notamment avec les entreprises.

Lancé en 2010, le premier programme d'investissements d'avenir (PIA1), piloté par le secrétariat général pour l'investissement (SGPI), impulse une nouvelle dynamique en faveur de l'innovation et du transfert des résultats de la recherche dans des secteurs stratégiques pour la France. La gestion des fonds est confiée aux principaux organismes nationaux de la recherche et aux établissements spécialisés dans l'accompagnement au financement de la recherche et de l'innovation. La banque publique d'investissement (Bpifrance), au sein de laquelle l'ancienne agence ANVAR est notamment fusionnée, est le principal opérateur des financements adossés au PIA lorsque ce dernier concerne directement le tissu économique. L'ANR est également engagée dans la gestion opérationnelle de cette stratégie, plus spécifiquement pour les projets de recherche amont, identifiés comme stratégiques ou porteurs d'un potentiel certain de valorisation, ou encore pour accompagner la structuration nationale d'organismes chargés de la mise en œuvre de cette valorisation. En 2011, huit Instituts de recherche technologique (IRT) sont créés avec pour mission de piloter des programmes de recherche sur des thèmes d'excellence, couplés à des plateformes technologiques, et de veiller à la valorisation économique des travaux réalisés. Les sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT) chargées de développer la valorisation de la recherche publique sur le territoire sont créées en 2012 suite à un appel à projet opéré par l'ANR.

Plusieurs vagues du programme d'investissement d'avenir (PIA) ont été lancées par les gouvernements successifs (PIA2 en 2013, PIA3 en 2015, PIA4 en 2021 renforcé en 2023 et pour cinq ans par le plan France 2030), multipliant les sous-programmes, ainsi que les voies de transmission, en faveur notamment de la recherche amont stratégique et des grands équipements adossés, de l'innovation et de la création d'entreprise, de l'accélération du transfert des produits de la recherche, ou encore en faveur du développement de formations. Devant la multiplicité des projets engagés par ces programmes successifs apparaît une réelle difficulté d'évaluation des actions financées [40].

3.4.3. Prospectives

Contrairement aux structures de valorisation françaises souvent basées sur un ancrage territorial et un scope généraliste, “le millefeuille américain est thématique” [Oumohand 2020]. La structuration géographique semble discutable car elle multiplie les organes de direction (et les dépenses associées) et les chercheurs impliqués dans les instances sont rarement directement scientifiquement concernés par les dossiers instruits, ce qui induit pour eux une perte de temps et pour la société une mauvaise exploitation des expertises scientifiques et techniques académiques qui pourraient mieux contribuer à l’innovation. Le découpage géographique a sans doute été choisi car très simple à initier, et bénéficiant de l’appui des politiques régionaux ou locaux, mais il est assez rare que les interlocuteurs industriels et académiques les plus pertinents soient localisés dans la même région. Les guichets de financement doivent aussi être centralisés au niveau national : quels que soient les types de partenaires, leur taille (de la start-up jusqu’au grand groupe), leur localisation géographique, l’application du projet etc... ce n’est pas au porteur de choisir le guichet en amont du dépôt mais au guichet unique de trouver le financement nécessaire en aval de l’évaluation (lorsque le projet a été jugé d’intérêt et avec des moyens adaptés aux objectifs, quel que soit le montant total). On peut y inclure les thèses CIFRE voire les contrats doctoraux MESR, dont la distribution se fait rarement sur la base d’évaluations scientifiques actuellement.

3.4.4. Références

[39] Adnot Philippe, Rapport d’information n° 341 (2005-2006) fait au nom de la commission des finances, Sénat, 2006

[40] Mainguet Maxime, La difficile évaluation des investissements d’avenir, Le Monde.fr, 2020

3.5. Conclusion – Phase constats

Cette première version du cahier du GIS S.mart nous a donné un lieu d’expression pour analyser, étayer les opinions que bon nombre d’entre nous entendent tous les jours. A travers cela, ce cahier permet d’ouvrir pleinement la discussion au sein des communautés scientifiques et industrielles afin de collectivement imaginer ce que peut ou doit être la formation et la recherche scientifique dans le domaine des sciences de l’ingénieur, de la conception, de la production... En bref de l’alliance entre les nouvelles technologies, la société et l’environnement dans les années futures.

N’hésitez pas à rejoindre ce lieu d’expression.

4. Annexes

Méthodologie déployée pour la rédaction du livre blanc

Introduction

La méthodologie pour la rédaction collaborative par les membres du Conseil Scientifique du G.I.S. S.mart de ce cahier est présentée dans cet annexe 1. Elle a été conçue pour garantir une progression logique et scientifique dans l'élaboration du document.

Processus de Réflexion et de Rédaction

Afin de co-construire le document et de rendre possible une mise à disposition progressive aux contributeurs avec une mise à jour régulière, nous avons décidé de séparer le processus d'échanges et de construction, et la rédaction du Cahier S.mart.

Première Phase : Discussions et Échanges

La première phase consistait en trois sessions initiales, où les discussions étaient lancées sous forme d'ateliers avec l'ensemble des membres du CS. Les discussions portaient sur les ambitions pour l'industrie et la société à 2050, les actions possibles et les axes de travail. Un alignement sur la rédaction d'un "Cahier S.mart" et l'identification des premiers axes de réflexion étaient également réalisés.

Deuxième Phase : Diagnostic et Analyse

La deuxième phase, menée depuis septembre 2024, incluait un diagnostic sur les enjeux de recherche et de l'enseignement autour de l'industrie de demain, mené à partir de plusieurs questionnements sur lesquels les membres du CS du G.I.S. S.mart devaient travailler. Les participants étaient invités à exprimer leurs opinions, inquiétudes et questionnements en une phrase ou quelques lignes. Puis, des références étaient identifiées et des données/références étaient recueillies pour confirmer ou infirmer les opinions lors des analyses réalisées par les contributeurs. Une analyse de l'état actuel était également réalisée pour synthétiser la situation actuelle. Cette phase s'appuyait sur les travaux trans-communautaires et a commencé au sein du CS du G.I.S. S.mart, mais avec l'ambition de s'étendre à d'autres communautés pour enrichir ce Cahier.

Processus de Rédaction et de Diffusion de la deuxième phase

Le processus de rédaction et de diffusion incluait l'identification de l'environnement de mise à disposition (drive, miro, site G.I.S. S.mart, etc.) et la définition de faire un document évolutif et appropriable par différentes communautés académiques 6.

Structure du Document

Le document a été structuré de la manière suivante 7 :

- **Préambule**
- **Des (r)évolutions industrielles**
- **La formation et la recherche académique : leurs évolutions en lien avec le monde industriel**
- **Éléments d'action issus des prospectives (A développer en deuxième phase)**

Pour chaque sous-section, nous avons adopté une structure systématique 4 :

- **Expression des opinions du monde académique** : Cette section peut naturellement être basée sur des éléments subjectifs mais “entendus”, “perçus” par la communauté académique (voire de la société civile).
- **Analyse étayée (chiffres, analyses...) des faits pour confirmer ou infirmer les opinions** : Cette section remet en contexte les évolutions/changements/choix adoptés puis apporte des éléments de références objectifs.
- **Identification / proposition d'éléments de prospectives afférents à chacune des sous-sections.**
- **Liste de références relatives à la section.**

Cette méthodologie permettait de structurer les échanges et la rédaction de manière collaborative et progressive, tout en garantissant une approche scientifique et logique.

A partir de ces premiers éléments de prospective, la partie IV adressera les résultats d'une démarche prospective menée sur ces sujets.

Troisième Phase : Réflexion Prospective

La troisième phase, prévue pour le printemps 2025, va inclure des ateliers de Réflexion Prospective (ARP) pour définir des actions et des propositions.

La prospective, c'est d'abord une attitude. Elle considère que l'avenir n'est pas à subir mais à construire. Cette attitude vise à se préparer au changement attendu mais aussi et surtout à provoquer les changements souhaités. C'est aussi tout un appareil méthodologique qui conforte cette attitude. Il permet d'en déduire des futurs possibles et de travailler sur un futur souhaitable. La prospective, ce sont également des discours qui émanent des acteurs ou des organisations sur leur avenir ou sur celui du monde qui les entoure. Philippe Durance, professeur du Conservatoire National des Arts & Métiers (CNAM) Paris, titulaire de la chaire de Prospective et Développement Durable. La méthode repose sur l'identification collective de facteurs de changement, la mise en place d'hypothèses d'évolution de ces facteurs et enfin la rédaction de scénario prospectifs.

Société sobre et juste en 2050 : à quoi peut ressembler l'industrie de demain ?

Cahier proposé par le conseil scientifique
du GIS S.smart

Ce travail collectif piloté par le Groupement d'Intérêt Scientifique S.smart souhaite être un outil de réflexion destiné aux chercheurs, formateurs, décideurs et acteurs du monde éducatif et industriel.

Il aspire à préparer les choix futurs et à favoriser une prise de décision éclairée en matière de formation, de recherche, de choix politiques et d'usage des technologies.

Notre collectif soutient ainsi une approche qui vise à dépasser une vision uniquement technocentrée.

Peut-être le temps est-il venu d'envisager un modèle scientifique et éducatif plus conscient, inclusif et soutenable, en accord avec les défis qui s'imposent aux sociétés du 21^{ème} siècle?



S.smart»

Systems.Manufacturing.Academics.Resources.Technologies