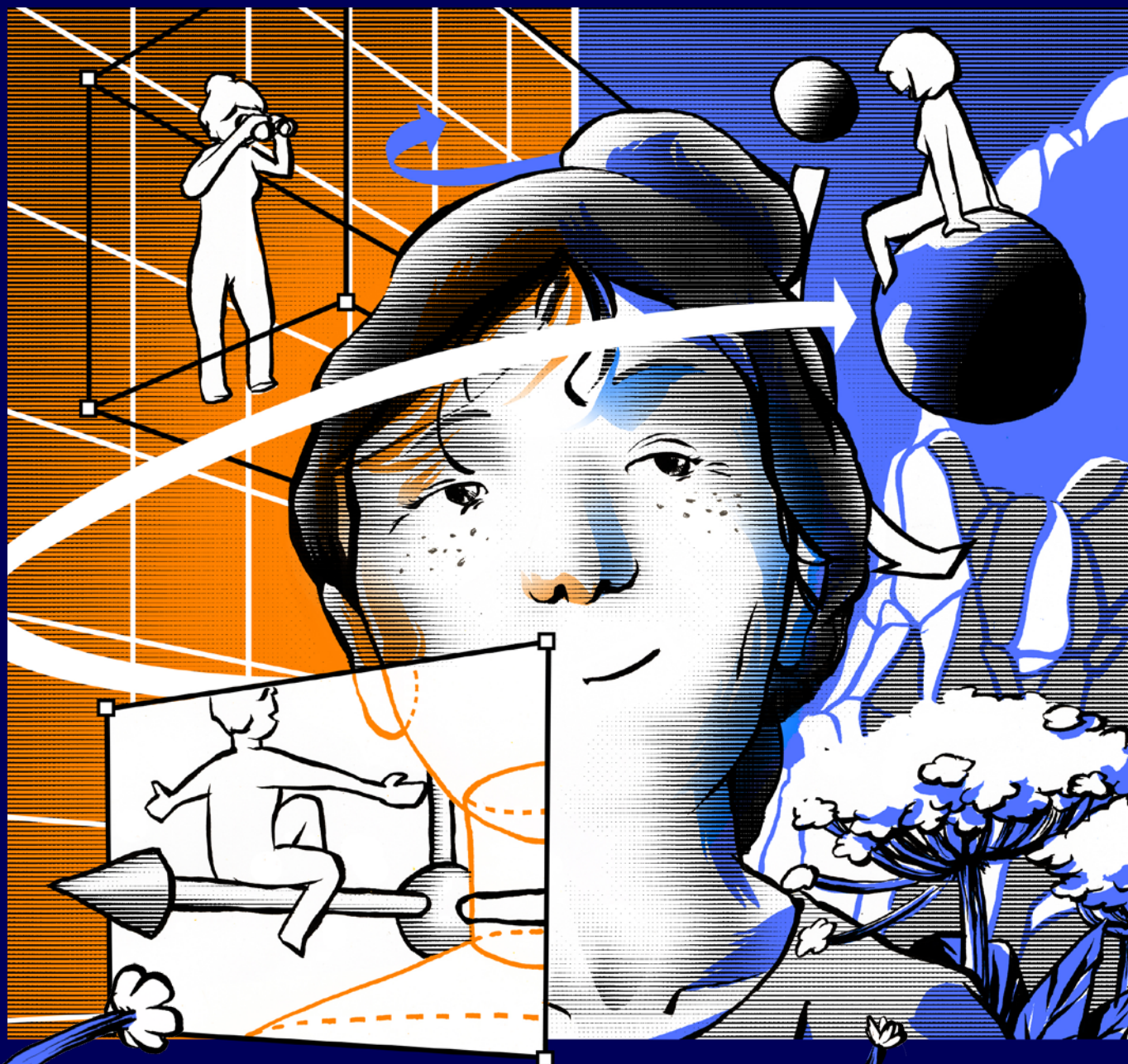




VOL.1 — MANIFESTE

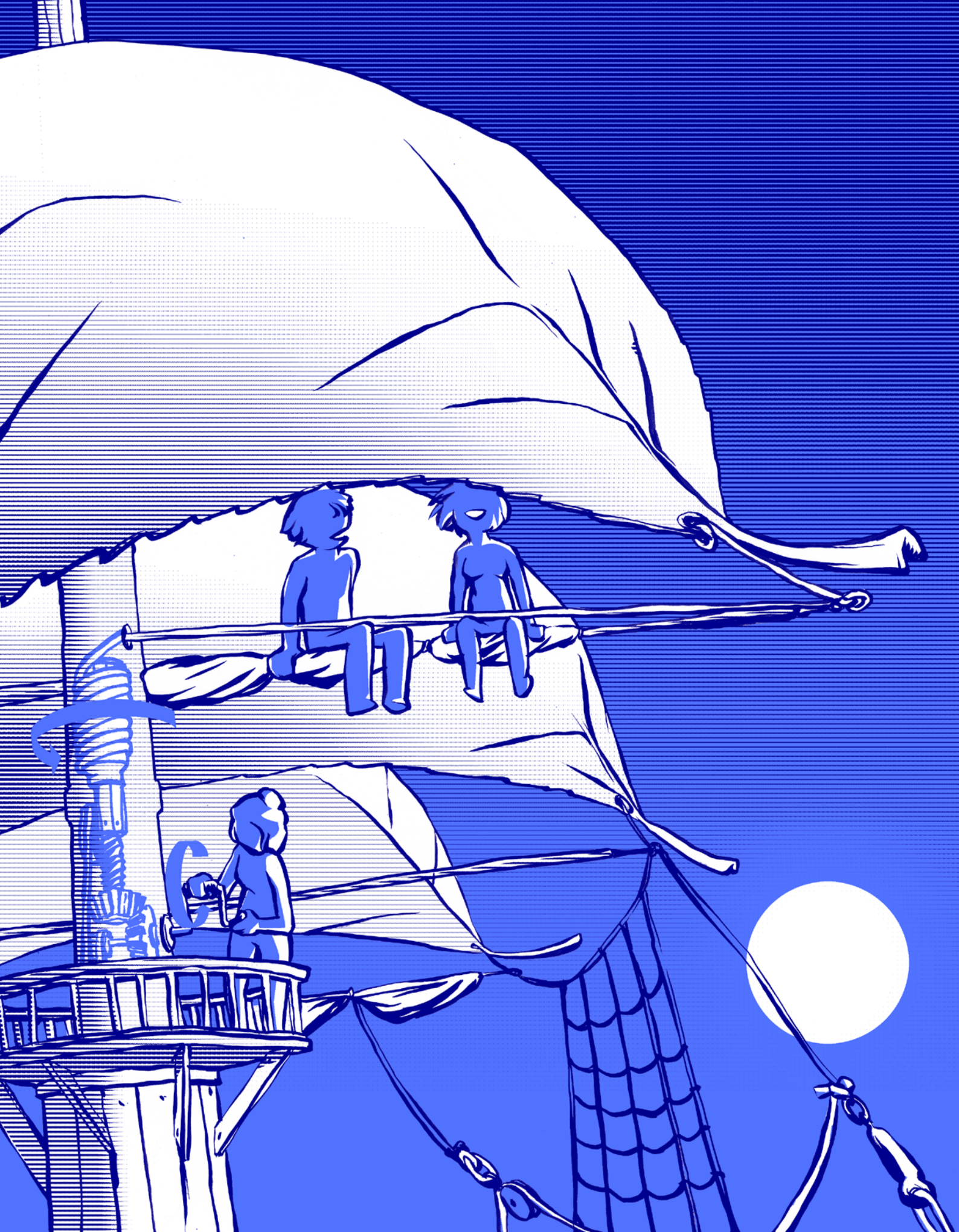
FORMER L'INGÉNIEUR DU XXI^e SIÈCLE

Pour l'intégration des enjeux
socio-écologiques en formation d'ingénieur

 **THE SHIFT
PROJECT**
THE CARBON TRANSITION THINK TANK

EN PARTENARIAT AVEC

GRUPE
INSA



« Tout problème bien posé est à moitié résolu. »

Henri Bergson

Préambule

CE MANIFESTE s'adresse aux écosystèmes des écoles d'ingénieurs françaises, et plus particulièrement aux enseignants-chercheurs, responsables pédagogiques, directions de formations et étudiants. Il tente de répondre de manière didactique aux questions suivantes :

À quels enjeux l'ingénieur doit-il faire face ? Le chapitre « *Prendre acte de notre héritage : pourquoi il est nécessaire de faire évoluer les formations d'ingénieur* » tente de dresser un constat de l'anthropocène et le lien avec les ingénieurs et les techniques.

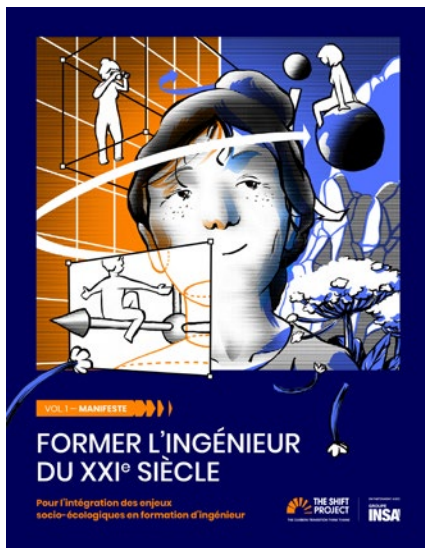
Comment peut-il y faire face ? Où le chapitre « *Bifurquer vers une société résiliente : quel rôle pour les ingénieurs et les techniques ?* » propose des trajectoires : quelles compétences pour l'ingénieur ? Quelles techniques pour répondre aux enjeux socio-écologiques ?

Comment faire évoluer les enseignements et pratiques pédagogiques des formations pour former cet ingénieur ? La partie « *Former les ingénieurs du XXI^e siècle* » propose des pistes d'approches pédagogiques adaptées à ces compétences et des principes de construction de programmes d'enseignement.

Ce document a été construit dans le cadre d'un projet en partenariat avec le Groupe INSA, visant à réaliser une étude de cas portant sur l'intégration des enjeux socio-écologiques dans les formations initiales d'ingénieurs. Ses auteurs sont des ingénieurs eux-mêmes, sortis d'école récemment ou avec une longue expérience dans les métiers de l'ingénierie. Ce travail est le condensat d'un travail collectif de réflexion et d'expérimentation mené sur 18 mois où professionnels, enseignants, élèves-ingénieurs, ingénieurs, scientifiques et experts ont été sollicités, et un travail de longue haleine.

Bien que le cas d'étude ait porté sur les écoles d'ingénieurs, ce travail a pour objectif d'être utilisé, modifié et amélioré pour servir à d'autres établissements de l'enseignement supérieur, voire du secondaire.

Mode d'emploi



VOLUME 1

Manifeste

Le manifeste est centré sur les objectifs de la formation, le contenu à enseigner et la manière de le faire (référentiel de connaissances et compétences de tronc commun, techniques de l'ingénieur, approches pédagogiques et programmation des enseignements sur la durée de la formation).

Il s'adresse aux enseignants, aux directeurs de formation et aux ingénieurs pédagogiques, mais aussi aux étudiants qui souhaiteront s'en saisir.



VOLUME 2

Guide méthodologique

Le guide propose une méthode pour engager l'évolution des formations en vue de former des ingénieurs compétents pour contribuer à une société résiliente et décarbonée. Il présente les étapes à suivre, le rôle des différentes parties prenantes et les moyens à mettre en œuvre.

Il s'adresse aux directions d'établissement, de formation ou de département mais aussi à toute partie prenante désireuse d'engager ce changement : institutions, enseignants, étudiants...



VOLUME 3

Retours d'expériences

Les retours d'expériences présentent le travail mené entre le Shift Project et le Groupe INSA (méthodologie, état des lieux, évolutions des formations) ainsi que différentes initiatives et expériences de l'écosystème des formations d'ingénieur.

Ils s'adressent à toute partie prenante de la formation des ingénieurs, particulièrement les directions de département ou de formation, les étudiants et les enseignants-chercheurs.

Préface INSA



Frédéric Fotiadu,
Directeur de l'INSA Lyon

« C'est une transformation systémique radicale dans laquelle nous sommes engagés et qui doit se poursuivre. »

DANS UN MONDE en constante évolution, où de nouveaux défis marquent et impactent notre quotidien, les écoles d'ingénieurs et plus généralement les établissements d'enseignement supérieur ont une responsabilité majeure. Nous devons nous fixer l'objectif de former celles et ceux qui vont pouvoir imaginer des solutions nouvelles, former les acteurs de la transformation des entreprises, de nos systèmes économiques, former des citoyens éclairés qui doivent pouvoir être entendus et qui doivent s'engager pour changer la société.

Les INSA sont des institutions uniques, dotées d'un héritage historique empreint d'idéaux et de valeurs d'une incroyable modernité. Les pères fondateurs de ce modèle, Gaston Berger et Jean Capelle, avaient à cœur de nourrir la jeunesse d'une formation technique et d'un engagement humaniste. Cette vision est encore plus nécessaire aujourd'hui qu'elle ne l'était en 1957, date de création de l'INSA Lyon.

En 2018, l'INSA Lyon a entamé aux côtés de The Shift Project une réflexion ambitieuse sur l'évolution de ses formations pour y intégrer les enjeux socio-écologiques. Depuis 2020, cette démarche pionnière est portée par le Groupe INSA et l'INSA Lyon est devenu l'un des fers de lance de cette impulsion collective.

Le travail mené depuis dix-huit mois par nos communautés aux côtés des équipes de The Shift Project a été massif, profond et mobilisateur. C'est une transformation systémique radicale dans laquelle nous sommes engagés et qui doit se poursuivre. Se poursuivre à l'échelle du Groupe INSA, mais aussi à l'échelle de l'enseignement supérieur. C'est pourquoi nous avons souhaité mettre à disposition de l'ensemble de la communauté les conclusions des travaux menés avec The Shift Project. Face à l'urgence de la situation, l'heure doit être à la mutualisation. C'est une dynamique vertueuse que nous souhaitons alimenter par notre démarche et notre retour d'expérience. Il ne s'agit pas d'essaimer, mais bien de partager. Que cette lecture puisse faire naître de nouvelles initiatives ambitieuses et transformantes. Il en va de l'avenir de notre jeunesse.

Préface The Shift Project

EXPLOITER AU MIEUX la connaissance scientifique pour le bénéfice de la collectivité : ainsi pourrait-on tenter de définir l'ingénieur, d'hier, d'aujourd'hui ou de demain. Pour autant, le résultat de ce mandat qui est le sien devrait fondamentalement changer.

Quand cette corporation s'est mise au service de la révolution industrielle, la science décrivant les limites planétaires était balbutiante ou inexistante. Par contre, celle proposant des explications sur l'agencement de la matière, les interactions du monde physique, et la façon de s'en servir pour construire machines et objets était en plein essor. Les ingénieurs se sont alors jetés à corps perdu dans la manière de créer de nouvelles applications matérielles, leur diffusion, et la gestion au mieux de l'organisation permettant de mettre au plus vite cette science « technologique » au service de la population.

Mais la science de demain, si elle garde à l'évidence cet héritage du passé, s'enrichit désormais chaque jour un peu plus d'une deuxième composante : celle de l'observation de l'environnement, et de la caractérisation de ce qu'il est désormais convenu d'appeler les limites planétaires.

La contrainte d'hier, que tout ingénieur intégrait dans son raisonnement, était locale. Nous avons localement un problème d'approvisionnement, d'épuration, ou de compétences. S'y rajoute désormais une contrainte globale.

La manière de définir le bénéfice de la collectivité s'en trouve nécessairement questionnée. Opérant hier dans un monde sans limites, on ne pouvait reprocher à l'ingénieur d'amener un objet ou service en plus, dès lors qu'en face rien ne pouvait être moins disponible.

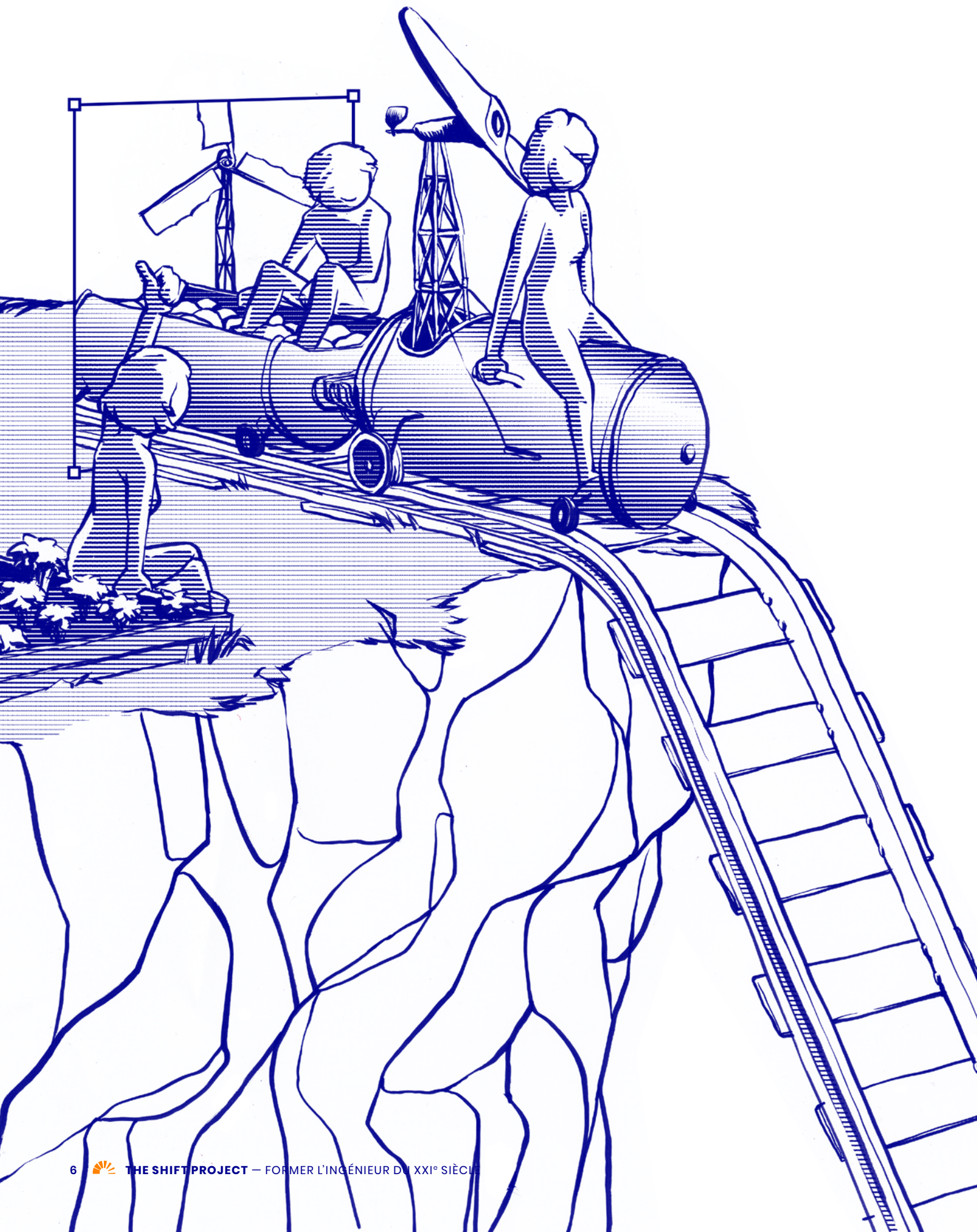
Mais maintenant que nous savons que notre vaisseau spatial est limité, fragile, épuisable, l'ingénieur devra prendre position sur l'arbitrage entre optimum de court terme et optimum de long terme. La finitude du monde a rajouté une dimension temporelle majeure à son métier.

Pour que ce dernier reste d'apporter « le progrès » à la population, les établissements qui forment des ingénieurs doivent lui enseigner toute la science : celle qui décrit l'état de la planète, et non uniquement celle qui permet de rendre le monde plus technique.



Jean-Marc Jancovici,
Président de The Shift Project

« L'ingénieur devra prendre position sur l'arbitrage entre optimum de court terme et optimum de long terme. La finitude du monde a rajouté une dimension temporelle majeure à son métier. »



Sommaire

INTRODUCTION

Préambule	2
Mode d'emploi de la publication	3
Préfaces INSA et Jean-Marc Jancovici	4

CHAPITRE 1

Prendre acte de son héritage : pourquoi transformer les formations d'ingénieur ?	8
L'humanité est entrée dans l'ère de l'Anthropocène	10
Les ingénieurs et l'ingénierie, au cœur du système technique ?	15
Former l'ingénieur à penser et agir pour la transition	20

CHAPITRE 2

Bifurquer vers une société résiliente : quel rôle pour les ingénieurs ?	28
Quels ingénieurs pour piloter ces trajectoires ?	30
Les compétences pour l'ingénieur du XXI ^e siècle	34
Les connaissances incontournables pour l'ingénieur du XXI ^e siècle	51

CHAPITRE 3

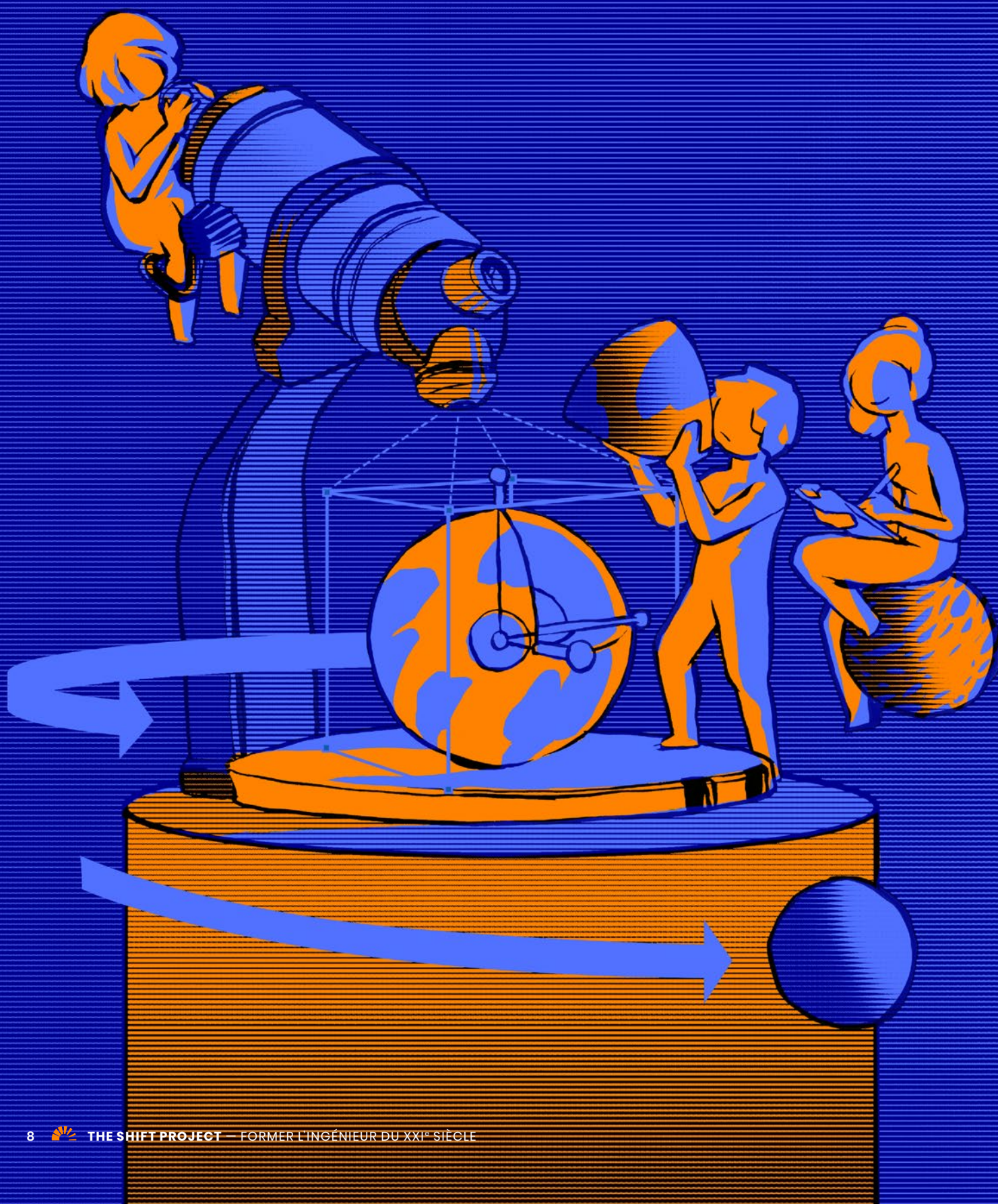
Bifurquer vers une société résiliente : quelles ingénieries et techniques ?	76
Comment transformer l'héritage des ingénieries ?	78
Quelles trajectoires pour l'ingénierie et les techniques ?	80

CHAPITRE 4

Agir dès maintenant : comment former les ingénieurs du XXI^e siècle	104
Comment enseigner les enjeux socio-écologiques ?	106
Comment élaborer un programme sur la durée de la formation ?	116

CONCLUSION

Pour finir	120
Annexes	122
Comité de rédaction et remerciements	128
Ressources & références	130
Acronymes & abréviations	132



CHAPITRE 1

Prendre acte de son héritage

POURQUOI TRANSFORMER LES FORMATIONS D'INGÉNIEUR?



Ce début de XXI^e siècle est marqué par l'accélération du changement climatique et par des événements climatiques extrêmes devenant plus fréquents, plus intenses, et par un effondrement de la biodiversité de plus en plus documenté. Leur médiatisation coucourt à une prise de conscience de plus en plus large de ces phénomènes. Des conséquences indésirables de la mondialisation deviennent de plus en plus visibles: destructions d'habitats, maladies chroniques, pandémies... Sans réfuter les apports de la technologie aux sociétés humaines, notamment en termes de niveau de vie ou d'espérance de vie, nous constatons que certaines conséquences du modèle industriel actuel nous rattrapent désormais. **Le projet « ClimatSup INSA – Former l'ingénieur du XXI^e siècle »,** comme d'autres travaux du Shift Project, souhaite proposer des **outils d'aide à l'action permettant d'apporter des réponses à cet enjeu majeur.**

L'urgence écologique : un défi d'une ampleur sans précédent pour l'Humanité

La description des enjeux écologiques figurant dans ce rapport vise à refléter la vision qu'en ont les équipes enseignantes avec lesquelles The Shift Project a travaillé. Elle dépasse donc le champ habituel qui est celui du Shift (climat-énergie), même si le think tank a apporté ses éclairages scientifiques tout au long du projet. Si les faits sur lesquels elle s'appuie sont scientifiquement fondés, cette formulation des enjeux correspond à celle dans laquelle se reconnaissent le plus les équipes d'enseignants d'écoles d'ingénieur ayant participé au projet, et à laquelle ils adhèrent. Ce discours mérite d'être mis en débat dans tout établissement souhaitant s'emparer de ces enjeux afin que les équipes se l'approprient à leur manière.

1 — De la notion d'anthropocène aux enjeux socio-écologiques : la difficulté de désigner le défi du siècle

Si la notion d'anthropocène a ses limites, elle a le mérite de la concision et permet de nourrir le débat grâce à une **approche interdisciplinaire**¹, au-delà d'une vision trop souvent limitée au champ de la physique lorsque l'on parle de la **crise écologique**. Par ailleurs, elle suscite suffisamment d'intérêt dans la communauté des enseignants-chercheurs pour mériter que l'on s'y attarde.

Depuis une dizaine de milliers d'années (début de l'agriculture), l'occupation par l'humain de son environnement a eu des conséquences sur la biosphère : disparition d'espèces animales et végétales, modifications des paysages... Depuis, le développement de la technosphère – qui désigne la partie physique de l'environnement affectée par les modifications d'origine humaine – a considérablement accéléré la modification de notre environnement. Certains scientifiques se proposent de nommer cette ère, « anthropocène » (anthropos signifiant « humain » et «-cène « ère »).

L'anthropocène désignerait cette « ère nouvelle dans l'histoire de la Terre où l'humanité dans son ensemble est devenue une force géologique capable d'approcher et, dans certains cas, d'atteindre les limites du système-Terre². »

Considérer les différentes hypothèses qui tentent de dater le début de l'anthropocène permet de chercher et identifier les niveaux de responsabilité des groupes humains formant l'*anthropos*. Cela « est essentiel pour **donner à voir que les conséquences de l'anthropocène sont le fruit des évolutions politiques passées, qu'elles ne sont pas toutes inéluctables et que sa trajectoire ne l'est pas non plus**³. ». Cette notion d'anthropocène, si elle n'est pas du goût d'un grand nombre de géologues, invoque pourtant de nombreuses considérations relevant du champ de la géologie, mais aussi de la climatologie. Plusieurs origines sont proposées pour qualifier le début de cette ère. En 2004, l'*International Geosphere-Biosphere Program* (IGBP) a posé les fondements d'une réflexion autour du phénomène de « **grande accélération** ».

La grande accélération désigne la période à partir du milieu du XX^e siècle durant laquelle le développement humain s'est fortement accéléré (augmentation de la population, consommation d'énergie primaire, utilisation d'eau douce, tourisme, etc.), avec des conséquences sans précédent sur les tendances du système Terre (acidification des océans, ozone atmosphérique, dioxyde de carbone, etc.)⁴.

Les indicateurs de cette grande accélération nous montrent de grands impacts socio-économiques et sur l'évolution du système Terre :

1. « Notion en débat : Anthropocène — Géococonfluences », Document, consulté le 15 décembre 2021.

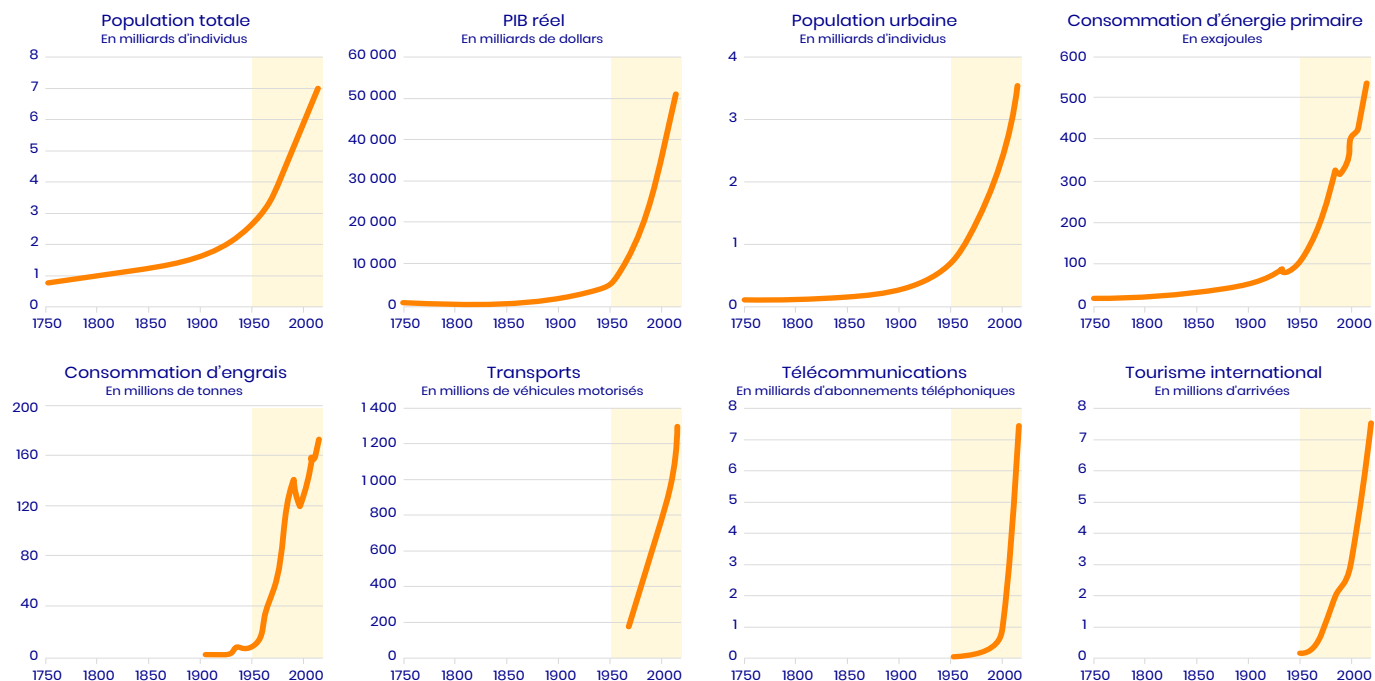
2. Jacques Treiner, « Fil conducteur pour une introduction à l'Anthropocène en début d'études supérieures », 2020

3. François Gemenne et Aleksandar Rankovic, Atlas de l'Anthropocène, Atelier de cartographie de Sciences Po (SciencesPo Les presses, 2019).

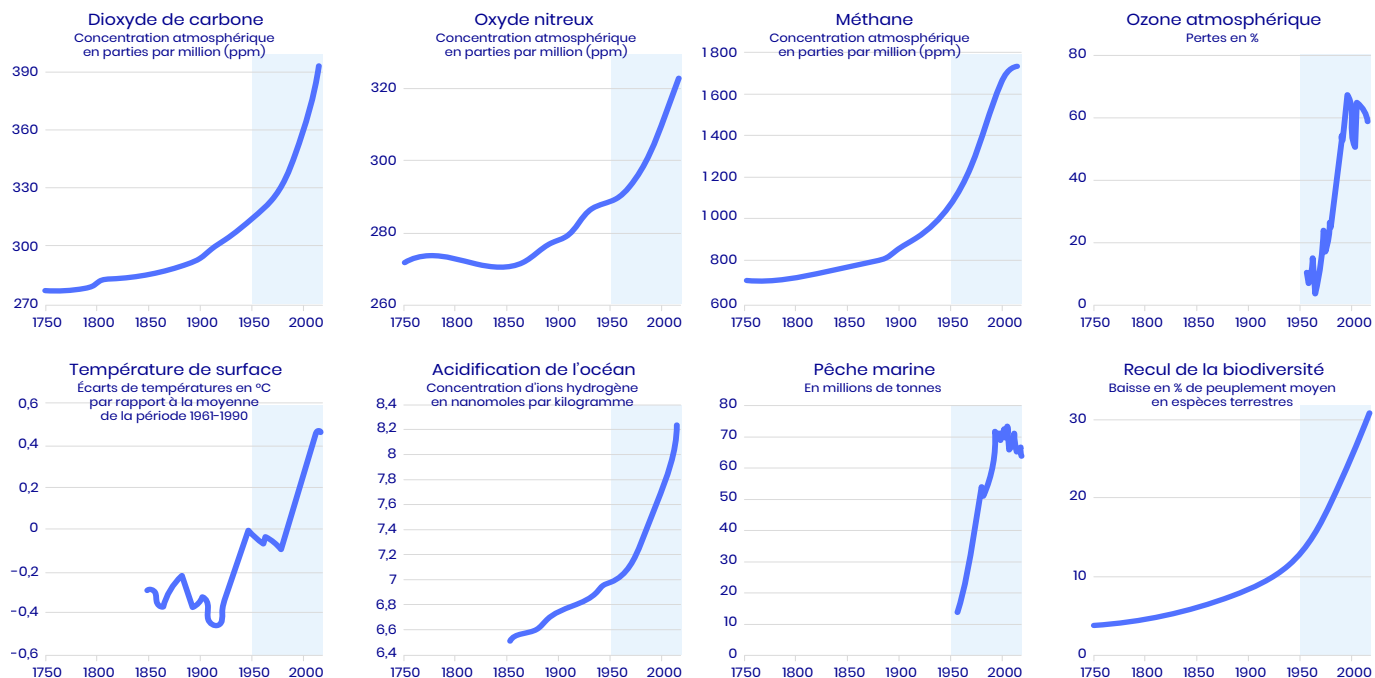
4. Will Steffen et al., « The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration », The Anthropocene Review, 2 mars 2015.

L'URGENCE ÉCOLOGIQUE : UN DÉFI D'UNE AMPLEUR SANS PRÉCÉDENT POUR L'HUMANITÉ

DÉVELOPPEMENT SOCIO-ÉCONOMIQUE



ÉVOLUTION DU SYSTÈME TERRE



Source : Will Steffen et al., « The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration », The Anthropocene Review, 2 mars 2015.

C'est la somme de ces bouleversements que les participants à ce projet (équipes INSA et Shift Project) ont choisi de désigner « enjeux socio-écologiques », afin de regrouper dans une notion commune à la fois les enjeux liés aux limites physiques de la planète, et leurs conséquences sociales. Englober ces notions permet de se doter d'une vision plus complète de la transition à mener, qui reprenne tout en les réinterprétant, les notions présentes dans des concepts polémiques (car empiriquement utilisés à mauvais escient, ou trop partiels...) comme ceux de développement durable, de responsabilité sociale et environnementale, d'économie circulaire, de transition énergétique...

Caractériser précisément la situation présente permet d'envisager des futurs cohérents avec les enjeux socio-écologiques actuels et de prendre, dès aujourd'hui et collectivement, les décisions les plus adéquates pour y répondre.

Qualifier la situation écologique actuelle de « crise écologique » signifierait qu'elle est passagère et qu'un retour à l'état antérieur est possible à brève échéance. Or **certains équilibres planétaires sont durablement bouleversés**, car ils seront encore visibles dans plusieurs milliers d'années (changement climatique, effondrement de la biodiversité, acidification des océans, usage des sols et de l'eau douce...), **mettant en péril la pérennité de la civilisation humaine telle qu'elle existe aujourd'hui.**

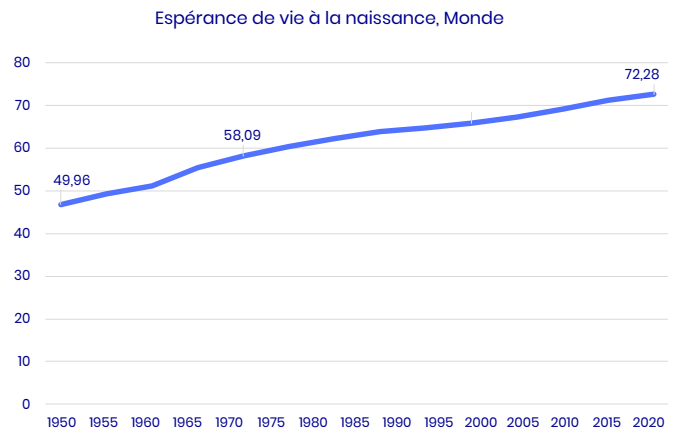
2 — Les causes de la situation socio-écologique actuelle : la rançon du développement économique

Comprendre les causes de la situation écologique actuelle est complexe, mais il s'agit d'une étape indispensable pour identifier la meilleure manière d'y répondre. **La grande accélération a été permise par la disponibilité importante d'énergie et la possibilité de l'extraire et de l'utiliser relativement facilement.** Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) ont ces qualités, et plus particulièrement le pétrole, qui cumule une possibilité d'extraction de l'environnement rentable énergétiquement et économiquement parlant, une bonne densité énergétique et une possibilité de le transporter facilement. L'utilisation de ces énergies via des machines a permis de démultiplier rapidement la capacité de production de biens et de services, et ce faisant, de transformer l'environnement. De 5 600 TWh d'énergie primaire consommée en 1800, l'humanité est passée à 28 500 TWh en 1950 et 173 000 TWh en 2019⁵.

Cette grande accélération est la contrepartie des fantastiques progrès effectués ces 150 dernières années, comme le formidable gain en espérance de vie au niveau mondial, ou les gains sur l'espérance de vie en bonne santé en France.

ESPÉRANCE DE VIE PASSÉE ET PROJECTIONS

Source : Nations Unies, 2019



Ces causes « physiques » sont liées à l'apparition d'un système industriel reposant sur l'utilisation massive d'énergies fossiles extraient des matériaux de l'environnement, les transforment, les transportent et les vendent. C'est ce système qui soutient le modèle économique actuel. **Ce modèle ne prend en compte ni les limites physiques planétaires ni (ou très marginalement) les externalités négatives que cette production implique** (gaz à effet de serre, pollutions diverses, destruction des habitats, diminution des ressources, etc.).

Même si des démarches de développement durable qui ont peu à peu vu le jour ont visé à équilibrer les sphères économique, sociale et environnementale, **c'est bien le principe d'une soutenabilité faible⁶ qui l'emporte aujourd'hui (la priorité va à l'économie au détriment de l'écologie et il revient donc au marché et à ses éventuelles régulations ainsi qu'aux solutions techniques d'apporter des solutions aux problématiques écologiques)** plutôt que le principe d'une soutenabilité forte (le capital naturel n'est pas substituable, l'économie un sous-ensemble de l'écologie, et en est donc tributaire).

3 — Conséquences écologiques & sociétales

En ce début de XXI^e siècle, la situation est alarmante^{7,8,9} :

► **Les sociétés humaines font face à une « double contrainte carbone »** : celle-ci se caractérise en aval par le changement climatique, touchant tous les peuples et résultat des émissions de gaz à effet de serre (GES), et en amont de la raréfaction progressive des sources intactes d'énergie fossile.

— **En aval, le changement climatique**, qui résulte des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine, et qui fait peser, aussi bien sur les sociétés humaines que sur le vivant, des risques d'une ampleur inédite comme le souligne depuis trois décennies le Giec. Depuis 1850, les activités

5. Hannah Ritchie et Max Roser, « Energy », *Our World in Data*, 28 novembre 2020.

6. Simon Dresner, *The Principles of Sustainability*, 2008.

humaines ont ajouté à l'atmosphère environ 2 400 milliards de tonnes de CO₂. Les estimations les plus récentes indiquent que le budget carbone restant pour respecter l'objectif de l'accord de Paris de contenir le réchauffement climatique planétaire nettement en-dessous de 2 °C d'ici 2100, est inférieur à 1 000 milliards de tonnes de CO₂, soit entre 20 et 25 ans d'émissions mondiales au rythme actuel. Le défi à relever est immense : à ce jour, l'ensemble des engagements des pays signataires de l'Accord de Paris conduit à un réchauffement climatique supérieur à +3 °C.

- **En amont, la raréfaction des ressources fossiles**, qui constituent plus de 80 % de l'énergie utilisée dans le monde, et dont le rythme d'extraction est de plus en plus contraint. Leur extraction devient de plus en plus coûteuse, donc de moins en moins rentable, particulièrement pour le pétrole en Europe, mais également dans les autres pays producteurs, contraignant l'approvisionnement en énergies fossiles de nos économies. C'est en particulier le cas pour le pétrole conventionnel, dont la production est passée par un maximum historique en 2008, et devrait inexorablement décliner¹⁰. « *La production pétrolière totale des principaux fournisseurs actuels de l'Union européenne risque de s'établir dans le courant de la décennie 2030 à un niveau inférieur de 10 à 20 % à celui atteint en 2019, faute de réserves suffisantes pour compenser le déclin de la production existante* »¹¹.

Au-delà de l'injonction à réduire leur consommation pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, cette raréfaction inéluctable oblige à prévoir la réduction de leur extraction et utilisation, puisqu'elle se fera de gré ou de force. Le caractère planétaire du changement climatique, et l'omniprésence des combustibles fossiles dans chacun des rouages de nos économies, font de cette double contrainte carbone **une contrainte systémique, à l'échelle du monde comme à l'échelle de la France**.

- **Une situation partiellement irréversible** : parmi les neuf limites planétaires, qui ont été définies comme des indicateurs de l'anthropocène, cinq sont dépassées¹² : changement climatique, perte de biodiversité, cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, changements d'occupation des sols, pollutions chimiques. Pour plusieurs de ces limites, un retour à l'état antérieur ne sera pas possible avant plusieurs dizaines ou centaines de générations humaines.
- **Des conséquences imprévisibles** auxquelles il faut se préparer : ces limites dépassées et avec les modèles actuels et leurs incertitudes, il devient de plus en plus difficile de prévoir les changements du système Terre qui adviendront, et donc de passer à l'action (difficile de prioriser entre différents paramètres, difficulté d'adaptation, etc.).

- **Les changements se produisent à l'échelle du système Terre**, qui concernent à la fois l'Humanité toute entière et les autres espèces vivantes : déplacements massifs de populations humaines, événements climatiques extrêmes, développement et diffusion accrus de maladies, extinction d'espèces, etc.
- **Une situation qui évolue à une vitesse jamais atteinte** dans l'histoire de l'Homme (vitesse de disparition d'espèces animales et végétales, vitesse d'augmentation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère, etc.). De plus, ces changements s'accroissent, comme l'illustre la « grande accélération », ce qui compromet encore davantage la capacité des espèces vivantes à s'adapter.
- **Les dérèglements physiques qui sont à l'œuvre ont des conséquences économiques, sociales et sociétales qui sont de plus en plus visibles** : destruction des lieux de vie humains, mise en péril du système alimentaire, risques sanitaires... Ces risques sont d'autant plus importants que les sociétés humaines ne sont pas préparées à y faire face. Ainsi, préserver le bien-être des sociétés humaines doit commencer par comprendre et répondre aux enjeux écologiques.

4 — S'adapter : un enjeu de résilience pour les sociétés humaines

Pour les sociétés humaines, cette situation de bouleversements et d'incertitudes pose de nombreuses questions. Après deux siècles où la croissance des flux physiques et la disponibilité des ressources naturelles ont semblé sans limite, **la société française comme l'économie mondiale, butent sur les limites écologiques**. La dernière fois que la société française a su planifier et mettre en œuvre de grands desseins communs, elle jouissait d'une croissance qui lui permettait d'investir massivement, tout en lui offrant quelque marge d'erreur. La France d'aujourd'hui n'a plus ce luxe : elle se rapproche, comme l'ensemble de l'économie mondiale, de limites physiques à la croissance matérielle.

Chaque société doit désormais décider comment réagir face à l'ampleur et au nombre de ces conséquences, et développer la résilience de ses systèmes sociaux et économiques. Cette résilience se manifeste par la capacité des sociétés à absorber les perturbations en se réorganisant ou en modifiant sa structure, tout en conservant ses fonctions essentielles, sa cohésion et ses capacités de gouvernance. **Pour The Shift Project, le caractère systémique de la double contrainte carbone légitime le choix de la décarbonation de l'économie comme point de départ pour entamer la transition écologique.**

7. Steffen et al., « The Trajectory of the Anthropocene », David Wallace-Wells, The Uninhabitable Earth. A story of the future. (Penguin Books, 2019).

8. Linn Persson et al., « Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities », Environmental Science & Technology, 18 janvier 2022.

9. Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Full Report, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, août 2021, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.

10. Agence internationale de l'énergie, World Energy Outlook 2010, « Executive summary », p. 6, World Energy Outlook 2012, p. 81, World Energy Outlook 2018, p. 142. En 2010, l'Agence internationale de l'énergie identifiait un pic du pétrole brut en 2006. Elle a rectifié en 2012, en fixant la date du pic du pétrole brut conventionnel à 2008.

11. The Shift Project, rapport « Pétrole : quels risques pour les approvisionnements de l'Europe ? », 27/05/2021.

12. Persson et al., « Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities ».

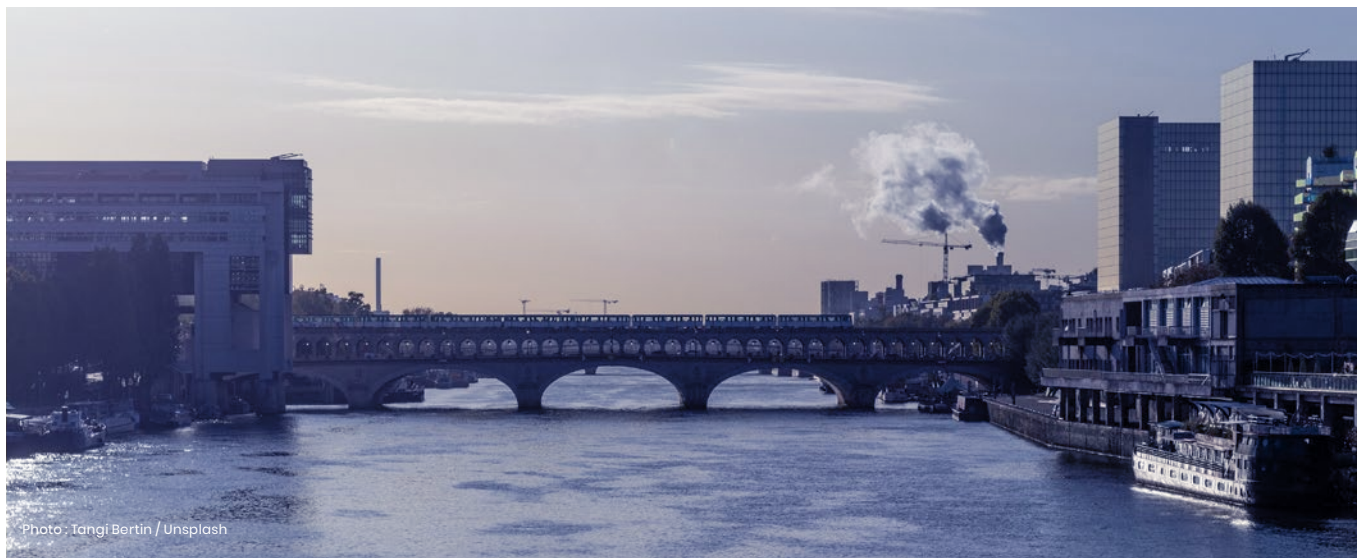


Photo : Tangi Bertin / Unsplash

Décarboner l'économie signifie la transformer, à la fois pour limiter autant que possible le dérèglement climatique, et pour réduire notre dépendance aux importations de combustibles fossiles. Cette transformation est facilitée par le fait de pouvoir être pilotée via un indicateur comptable unique, reconnu et normalisé (Normes ISO 14040 et suivantes) : la quantité d'émissions d'équivalent CO₂.

Il existe en France plusieurs propositions de trajectoires (celles de RTE, de l'Ademe, de l'Association Négawatt, notamment). **Dans ce cadre, The Shift Project propose un Plan de Transformation de l'Économie Française (PTEF)^{13,14}. L'originalité de ce plan, qui le rend particulièrement intéressant pour des ingénieurs, est de reposer sur une approche prenant en compte les enjeux physiques de notre monde, et d'évaluer la résilience de notre système socioéconomique, notamment de nos services d'intérêt général, face à ces contraintes physiques.** Présenté sous la forme d'un plan opérationnel, il propose un ensemble de mesures sectorielles à l'échelle de la France, qui ne sont pas contraintes par des accords ou des engagements internationaux signés par la France, et qu'il est possible d'évaluer et de piloter via l'indicateur facilement objectivable de la double contrainte carbone, et des enjeux de résilience que posent la double contrainte carbone..

Certes, à ces contraintes physiques s'ajoutent d'autres vulnérabilités et instabilités majeures, qui peuvent se traduire par des crises sanitaires, sociales, ou encore des troubles géopolitiques ou économiques. Si ces enjeux méritent d'être étudiés à leur juste valeur, l'exercice est bien plus délicat que la prise en compte des enjeux physiques, plus facilement objectivables.

Après deux siècles où la croissance des flux physiques et la disponibilité des ressources naturelles ont semblé sans limite, **la société française, comme l'économie mondiale, bute sur les limites écologiques.** La dernière fois que la société française a su planifier et mettre en œuvre de grands desseins communs, elle jouissait d'une croissance qui lui permettait d'investir massivement, tout en lui offrant quelque marge d'erreur. La France d'aujourd'hui n'a plus ce luxe : elle se rapproche, comme l'ensemble de l'économie mondiale, de **limites physiques à la croissance matérielle.**

C'est en reconnaissant que les sujets d'« environnement » ne sont pas extérieurs à nos modes de production et de consommation actuels mais inhérents à ceux-ci que nous pourrions enclencher la transformation qui s'impose. **Cet objectif est également l'occasion de rassembler la société derrière un projet commun. Il y a urgence.**

À noter

L'exercice proposé par le Plan de transformation de l'économie française est mentionné ici à titre illustratif afin de permettre au lecteur de se faire une idée de certaines contraintes structurantes et pour proposer la vision de ce que peut être un scénario reposant sur les contraintes physiques imposées par notre monde. L'exercice du PTEF a certainement ses limites. Plus de détails par secteur en sont mentionnés plus loin, toujours à titre illustratif.

13. « Crise(s), climat : plan de transformation de l'économie française », The Shift Project, consulté le 16 décembre 2021

14. ilnousfautunplan.fr, The Shift Project, 2021

Les ingénieurs et l'ingénierie au cœur du système technique ?

Réfléchir à la manière dont les formations d'ingénieur peuvent évoluer impose, au préalable, de faire un état des lieux du métier d'ingénieur, de ses responsabilités, de l'apport actuel des formations d'ingénieur, et de la sociologie des ingénieurs.

1 – Ingénieur, un terme recouvrant des réalités multiples

La Commission des titres d'ingénieur (CTI), autorité reconnue pour son rôle d'évaluation et d'accréditation des formations d'ingénieur, révisé régulièrement (et il convient de saluer cette démarche) la définition du métier de l'ingénieur¹⁵:

« Le métier de l'ingénieur consiste à poser, étudier et résoudre de manière performante et innovante des problèmes souvent complexes de création, de conception, de réalisation, de mise en œuvre et de contrôle de produits, de systèmes ou de services – éventuellement leur financement et leur commercialisation – au sein d'une organisation le plus souvent compétitive. Il intègre les préoccupations de protection de l'Homme, de la société et de ses valeurs, de la vie et de l'environnement, et plus généralement du bien-être collectif.

L'activité de l'ingénieur mobilise des ressources humaines et des moyens techniques et financiers. Elle contribue à la création, au développement, à la compétitivité et à la pérennité des entreprises et des organisations, dans un cadre international.

Elle s'exerce dans les secteurs privés, publics et associatifs, dans l'industrie et les services, le bâtiment et les travaux publics ainsi que dans l'agroalimentaire au sens large.

Dans les faits il y aurait lieu de parler au pluriel de « métiers » d'ingénieur.»

► **La compréhension du fonctionnement des dispositifs techniques et la capacité à concevoir et mettre en œuvre ces dispositifs**, en coordination avec d'autres acteurs, placent les ingénieurs parmi les principaux détenteurs du savoir technique.

► **Le rôle de l'ingénieur dans la société peut s'apparenter à celui d'un médiateur, à la fois entre l'humain et la nature**, via la conception et la production d'objets techniques qui transforment notre environnement ; **et entre l'ensemble des parties prenantes des projets auquel il participe** : donneurs d'ordre, collaborateurs techniques et non techniques, internes ou externes à l'entreprise pour s'assurer du respect du cahier des charges, organiser et coordonner les travaux des parties prenantes, « traduire » les enjeux techniques aux parties prenantes qui en ont besoin, participer aux décisions.

QUELQUES CHIFFRES :

20,5 %

La proportion de femmes ingénieures. Cette proportion augmente lentement, et le nombre de diplômées s'approche des 30 % sur les dernières promotions (28 % en 2021)¹⁶. Cette moindre représentation des femmes s'explique par le fait qu'elles sont bien moins nombreuses à s'orienter dans les filières scientifiques ou sélectives, alors qu'elles réussissent mieux aux examens¹⁷.

3,5 %

des ingénieurs étaient au chômage en 2020, si on intègre les jeunes à la recherche d'un premier emploi, ce qui est très bas par rapport au taux de chômage du pays¹⁸. Si le métier d'ingénieur a été affecté par la crise Covid en montant à 4,7 % de chômage en 2021¹⁹, il reste néanmoins un métier de plein emploi et donc recherché, et préféré par de nombreux parents (81 %²⁰) de jeunes étudiants.

44 %

des ingénieurs en activité n'ont pas de diplôme d'ingénieur, ce sont des « ingénieurs de métier »²¹ (chiffres de 2013).

43 %

des ingénieurs diplômés n'exercent pas un métier d'ingénieur au sens de l'INSEE²².

80 %

des ingénieurs en activité « sont ou ont été des ingénieurs d'études ou des ingénieurs de production », mais seulement 20 % des ingénieurs ont eu ces deux activités²³. Les activités de recherche et développement (études, recherche, conception, production...) sont au cœur des activités des ingénieurs.

87,2 %

des ingénieurs diplômés en 2020 sont cadres dès leur sortie d'école (89,9 % des hommes, 81,4 % des femmes).

ACTIVITÉS ET FONCTIONS EXERCÉES PAR LES INGÉNIEURS EN 2017

Source : IESF 2018



Quelles sont les responsabilités et les marges de manœuvres des ingénieurs ?

La marge de manœuvre des ingénieurs n'est pas uniquement liée à leurs responsabilités hiérarchiques ou aux missions de leurs postes. Si les ingénieurs sont, comme les autres employés, contraints par les décisions des managers de leur structure, ils peuvent eux aussi disposer d'une plus grande marge de manœuvre selon les situations et les structures. Tout métier dispose d'une marge de manœuvre pour des décisions personnelles. Pour autant, il serait erroné de s'imaginer que le système technique n'a été décidé et mis en œuvre que par des ingénieurs qui seraient totalement autonomes dans leurs choix et décisions.

Par exemple, un ingénieur récemment diplômé peut choisir la structure (entreprise, association, société coopérative, etc.) et le domaine dans lesquels il va travailler. Il est souvent cadre dès sa sortie d'école²⁴, et il exerce de multiples responsabilités (tableau ci-dessous) au sein desquelles il peut agir, qu'elles soient hiérarchiques, budgétaires, managériales ou de projet. Les nombreuses compétences, y compris « transversales », qu'il a acquises au cours de sa formation supérieure, lui permettent de faire évoluer les pratiques dans son écosystème direct. Si certains jeunes ingénieurs peuvent se sentir limités par un sentiment d'illégitimité, leur méconnaissance des rouages de l'entreprise ou un management très directif, ils n'en sont pas pour autant impuissants.

RESPONSABILITÉS EXERCÉES PAR LES INGÉNIEURS DÈS LEUR PREMIER POSTE À LA SORTIE DE L'ÉCOLE, PROMOTION 2020.

Source : Enquête premier emploi 2020, Conférence des Grandes Ecoles

Responsabilités...	Ingénieurs	Ingénieures	Total
... hiérarchiques	27,7 %	22 %	26,1 %
... d'un budget	25,5 %	22,5 %	24,6 %
... d'une équipe	23,9 %	19,3 %	22,6 %
... d'un projet	61,5 %	61,8 %	61,6 %

24. CGE, « Enquête insertion premier emploi », 15 juin 2021.

25. RSO : Responsabilité Sociétale des Organisations

26. CGE.

Lorsqu'il est expérimenté, les propositions d'un ingénieur peuvent aussi avoir un impact notable, en particulier lorsqu'il exerce des fonctions de management intermédiaire ou de chef de projet. Grâce à ses années de pratique, il a acquis une assise technique, une certaine compréhension du fonctionnement des entreprises et du secteur dans lequel il exerce, qu'il travaille dans l'industrie (43 %), le tertiaire (31 %) ou une société de services (16 %). Par exemple, s'il travaille en Recherche & Développement, il peut influencer l'organisation pour déployer l'écoconception ou d'autres critères de conception prenant mieux en compte les enjeux socio-écologiques. S'il exerce un poste de direction, s'il ou est membre de comités de pilotage, il peut influencer différents pans de l'organisation : réaliser un bilan carbone, en demander un bilan carbone aux fournisseurs, redéfinir/serrer les critères de sélection des matériaux, réaliser des évaluations des impacts sociaux et écologiques avant toute prise de décision majeure, recruter des collaborateurs en prenant en compte leurs compétences pour mieux pouvoir prendre en compte les enjeux socio-écologiques, etc. Enfin, il peut postuler à un poste de Responsable RSO²⁵ (Responsabilité Sociétale des Organisations), demander la création d'un tel poste ou d'un poste de *Chief Impact Officer*.

Dans le cas où un ingénieur ne verrait pas ses remarques entendues (comme dans le cas du « *Dieseldgate* »), son éthique personnelle peut l'amener à recourir à des actions plus frontales et engageantes. **Après avoir informé de dérives, ou tenté de modifier lui-même certaines pratiques en désaccord avec ses valeurs morales, il peut toujours, en cas d'échec (et en derniers recours) :**

- **Devenir lanceur d'alerte.** La possibilité de se constituer lanceur d'alerte est influencée par des facteurs structurels et personnels (capacité technique à évaluer les impacts indésirables suspectés, inertie pour prendre en compte des alertes, situations « hors processus » paralysante pour les managers, etc.).
- **Démisionner. Une grande dissonance cognitive ou l'atteinte à ses valeurs morales peuvent déclencher une telle décision**, qui est parfois vue comme la seule solution face à un dilemme ou une situation ressentie comme inacceptable. Or le taux de chômage est en moyenne faible et que le niveau de salaire moyen est élevé (36 345 € par an pour les hommes et 34 104 € par an pour les femmes²⁶) par rapport à la moyenne française, ce qui rend cette situation plus facile que pour d'autres professionnels.

D'autres critères sont à prendre en compte dans cette analyse, tels que la taille de l'entreprise ou le secteur d'activité. Ou encore, les ingénieurs en génie civil faisant souvent remarquer que leur marge de manœuvre est étroite, voire inexistante étant donné qu'ils répondent directement au donneur d'ordre et/ou à l'architecte. Pour autant, l'ingénieur n'est pas qu'un exécutant : il peut, aussi, être force de proposition, voire être un puissant vecteur de changement.

Si les ingénieurs exercent des métiers assez hétérogènes, et que leurs pratiques varient, on peut relever des éléments culturels communs qui se démarquent souvent^{27, 28}.

- ▶ **Leur rationalisme technologique**²⁹ (défini comme une « *Tournure d'esprit, [un] mode de pensée qui n'accorde de valeur qu'à la raison, à la pensée logique* » par le dictionnaire du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales), **peut souvent leur donner une position d'expert** sur des questions scientifiques et techniques au sein de la société.
- ▶ **Leur capacité à travailler en interdisciplinarité** avec d'autres corps de métier, remarquée en entreprise, semble s'être renforcée ces dernières décennies grâce à l'introduction des projets et d'autres enseignements transversaux dans les parcours de formation d'ingénieurs..
- ▶ **Une partie d'entre eux méconnaissent les sciences humaines et sociales (SHS) et ne leur accordent que peu d'importance dans leurs réflexions et pratiques**, notamment du fait d'une faible inclusion de ces disciplines dans la plupart des formations d'ingénieurs. **La place qui est accordée aux sciences humaines et sociales varie beaucoup entre les établissements et les spécialités.**
- ▶ À l'image de beaucoup d'entreprises au sein desquelles ils travaillent, **leur positionnement est la plupart du temps apolitique et ils croient en la neutralité de la technique**, c'est-à-dire que seul compte et influence est l'usage que l'on fait des produits ou des services créés, et non leur existence.
- ▶ Récemment **l'éco-anxiété**³⁰ (aussi appelée *solastalgie*³¹) ou la dissonance cognitive (conflit intérieur entre les valeurs et les pratiques de quelqu'un) d'étudiants ou d'ingénieurs en activité ont fait émerger différentes initiatives visant à **questionner le rôle de l'ingénieur dans l'organisation et la société.**

À noter

Si la compétence des ingénieurs en fait le pivot des évolutions technologiques de notre monde, avec les externalités positives et négatives évoquées plus haut, une prise de conscience s'opère actuellement de la part de jeunes et futurs ingénieurs souhaitant exercer leurs métiers en tenant en compte des enjeux socio-écologiques.

2 – L'ingénierie : une activité présentant un large champ d'action

Comment prendre ses responsabilités en tant qu'ingénieur, dans un monde marqué par une civilisation industrielle reposant sur un usage toujours accru de combustibles fossiles, dans lequel les externalités négatives sont de plus en plus importantes ?

L'un des leviers est sans doute d'agir autrement, de développer de nouvelles compétences personnelles. Pour cela, il convient de bien comprendre ce qu'est aujourd'hui l'ingénierie, afin d'envisager son rôle et d'identifier dans quelle mesure elle peut contribuer à ce que la société dans son ensemble bifurque vers une plus grande résilience.

L'ingénierie est souvent définie de manière limitée, comme « un ensemble de savoirs scientifiques et de techniques pour l'ingénieur », car elle désigne d'abord un ensemble de compétences plutôt qu'un ensemble de métiers, et il est courant de considérer que l'ingénieur est le seul praticien de l'ingénierie. Une définition plus sociologique dévoile d'autres aspects :

L'ingénierie est « une action qui prend place au cœur d'un réseau sociotechnique complexe, mettant en risque de multiples êtres animés et inanimés et consistant fondamentalement à transformer des idées abstraites en objets concrets. » Elle possède trois caractéristiques principales :

1. « l'ingénierie est le produit d'une communauté humaine complexe et multiforme. Les sujets de l'agir technique sont des ingénieurs, mais aussi des techniciens, des cadres non techniques, des décideurs [...]. Sa nature est hybride : inextricablement technique, économique, sociale et politique ;

2. cet agir est doté d'une capacité de transformation du monde réel dont les conséquences sont parfois irréversibles et partiellement inconnues [...];

3. l'ingénierie est caractérisée par un acte central : l'acte de conception industrielle, le design^{33, 34}. »

Puisque l'ingénierie est de nature à la fois technique, économique, sociale et politique, et qu'elle conduit à transformer notre environnement et optimiser les processus, elle doit donc pouvoir **jouer un rôle crucial dans la réponse à la crise socio-écologique**. Plusieurs raisons expliquent qu'elle n'ait pas, ou pas encore, pris ce rôle :

27. Catherine Roby, « Place et fonction des sciences humaines et sociales dans les écoles d'ingénieurs en France » (Thèse de doctorat en science de l'éducation, Centre de recherche sur l'éducation, les apprentissages et la didactique (CREAD), Université Rennes 2, 2014). ; Toutes les définitions données sont issues du Centre national de ressources textuelles et lexicales (CNRTL)

28. Conclusions tirées de l'analyse d'une vingtaine d'entretiens d'(élèves-)ingénieurs menés par The Shift Project dans le cadre du projet ClimatSup INSA de mai à septembre 2021.

29. « Tournure d'esprit, mode de pensée qui n'accorde de valeur qu'à la raison, à la pensée logique. » Définition issue du Centre national de ressources textuelles et lexicales (CNRTL).

30. Forme de souffrance et de détresse psychique ou existentielle causée par l'écart entre les changements environnementaux (passés, actuels ou attendus), leurs conséquences et nos capacités individuelles et collectives à y faire face. (Définition adaptée de Wikipédia)

31. Mary Doizon, *Etude : les jeunes n'ont jamais été aussi anxieux*, Mr Mondialisation, 2021. Accessible en ligne.

32. Didier, *Les ingénieurs et l'éthique. Pour un regard sociologique.*; Christelle Didier, « L'éthique chez les ingénieurs (2) », s. d., 2.

33. Design : « Cet acte est le processus par lequel des objectifs ou des fonctions prennent forme dans des plans de réalisation d'un objet, d'un système ou d'un service ayant pour visée d'atteindre l'objectif ou d'effectuer cette fonction », d'après la même source.

34. Didier, *Les ingénieurs et l'éthique. Pour un regard sociologique.*

► **L'ingénierie est surtout utilisée dans le cadre d'un modèle économique non soutenable** : c'est la vision d'une soutenabilité faible, qui privilégie les objectifs financiers de court terme à la durabilité, qui a principalement guidé les orientations industrielles et les programmes de formation à l'ingénierie³⁵. Ainsi :

- **L'ingénieur conçoit et met en œuvre des objets, des services, des processus qu'il a rarement choisis lui-même, et qui contribuent souvent à développer un système économique favorisant l'obsolescence et la surconsommation** : conception de produits à durée de vie délibérément raccourcie, ou techniques énergivores de marketing, incitant à consommer toujours plus.
- **La recherche d'efficacité et l'optimisation sous contraintes sont les grandes forces de l'ingénierie** : améliorer la performance d'un produit ou réduire son coût de production,

optimiser des flux logistiques, concevoir de nouvelles fonctionnalités, anticiper des situations imprévues, gérer des risques, sont des activités habituelles pour beaucoup d'ingénieurs. Mais ils sont aussi capables d'améliorer des processus techniques et organisationnels, de développer des outils et procédures de contrôle, d'analyse, de correction et d'amélioration continue pour renforcer cette optimisation.

- **Sauf à ce que la réglementation en vigueur impose des critères spécifiques, cette capacité d'optimisation répond aujourd'hui le plus souvent au triptyque Q-D-C (Qualité, Délai, Coût)**, auquel on adjoint parfois une évaluation des prestations, des fournisseurs et plus rarement des impacts sociaux ou écologiques. Les donneurs d'ordre et les pratiques de l'ingénierie commencent à intégrer des critères sur les contraintes socio-écologiques, mais à un niveau encore largement insuffisant et de manière très hétérogène en fonction des organisations :

Les enjeux écologiques

Les critères de conception (design), en grande partie d'origine industrielle et conçus avec l'idée que le monde était infini, ne prennent que rarement en compte des critères d'évaluation des conséquences sur le climat, les besoins énergétiques (stocks et flux), les cycles biogéochimiques, les océans... d'un usage unitaire et à grande échelle des objets techniques ainsi conçus (par exemple en évaluant les effets rebond que provoquerait un usage généralisé de ces objets).

Des initiatives existent pour limiter les impacts d'un produit (par exemple sur les émissions de gaz à effet de serre ou la biodiversité), ou l'orienter vers la restauration de la biosphère (par exemple, les bateaux de The Ocean Cleanup).

Les objectifs sociétaux comme la santé et la réduction des inégalités

Bien que des avancées techniques aient permis des avancées sociales majeures (par exemple, nourrir près de huit milliards de personnes, ou conserver des aliments grâce à la maîtrise de la chaîne du froid), les objectifs sociétaux sont rarement centraux et n'ont souvent que peu de traduction directe dans les modélisations et conceptions utilisées par les ingénieurs.

Le verrouillage technologique que certaines techniques peuvent générer ne sont pas presque jamais pris en compte dans le cycle de vie d'un produit : par exemple, l'adoption d'énergies bas-carbone peut être fortement freinée par des mécanismes d'autorenforcement de la technologie dominante : économies d'échelle, effets d'apprentissage, état de la connaissance, coût du changement...

- **L'ingénierie est souvent soumise à des chaînes décisionnelles dont les parties prenantes n'ont pas été formées à comprendre le fonctionnement des systèmes techniques**. Une analyse par scénarios des impacts positifs et négatifs, utilisant les méthodes d'évaluation de l'ingénierie, peuvent permettre de déterminer les impacts globaux d'un produit ou objet, et d'éviter de s'appuyer sur des idées préconçues. Par exemple, si l'on n'y prend garde, réduire la quantité de matière d'un produit pour réduire les émissions de gaz à effet de serre qu'engendre sa production peut conduire à la casse prématurée de ce produit et son remplacement plus fréquent, donc à une hausse globale des émissions au lieu de leur réduction. Les organisations doivent inclure ces évaluations dans leurs processus d'ingénierie, et disposer de compétences que requiert leur réalisation.

- **L'ingénierie manque souvent de réflexivité sur sa propre manière de faire**, à l'instar du système économique qui fait appel à elle. Par exemple, une partie importante de l'ingénierie actuelle est actuellement orientée vers la nouveauté high-tech, en négligeant de prendre en compte des effets potentiellement délétères au regard des enjeux humains et environnementaux : changement climatique, dépendance à des énergies fossiles de plus en plus déplétées et chères... Dans les imaginaires collectifs, « innovation » et « créativité » surpassent « maintenance » et « réparabilité ». Même s'il existe des réflexions sur ces questions, elles se traduisent encore peu souvent dans les pratiques.

35. H. Daly and all., *Valuing the earth* (MIT Press, 1992).

En résumé

Si l'ingénierie dépend fortement d'un système non soutenable, elle dispose de nombreux atouts, comme la capacité à mettre en évidence les impacts (avantages et inconvénients) de toute activité, et à optimiser sous contraintes. Elle est donc particulièrement à même d'adapter les techniques pour intégrer en leur cœur de nouveaux critères socio-écologiques.

3 — Les choix techniques ont des incidences politiques

Comment influencer positivement ce système économique non soutenable, dont l'ingénierie dépend ? Pour évaluer le potentiel de l'ingénierie, un détour par la relation entre technique et usage s'impose. Les pratiques d'ingénierie et les choix techniques sont-ils neutres ? Sont-ils « politiques », c'est-à-dire relatifs à la société organisée, influençant cette dernière (et non pas dans le sens « d'un parti politique », ni d'une lutte sociale, ni d'une idéologie, ni dans le sens de la politique « politicienne ») ?

Les techniques sont souvent présentées et comprises comme étant surtout des moyens, dont l'impact dépend de « ce que l'on en fait », et qu'elles n'influeraient pas par elles-mêmes le résultat. Pourtant, au regard de la diversité des trajectoires que peut prendre le « progrès technique », et des incidences que telle ou telle innovation technique a pu avoir sur l'environnement, il apparaît de plus en plus clairement que le choix de l'orientation de tel ou tel programme de recherche appliquée, et le choix de la diffusion dans l'économie ou la société de tel ou tel produit issu de cette innovation, n'ont aucun impact politique. On trouvera ci-dessous quelques exemples pour illustrer ce constat :

- Les choix techniques ont des impacts sur les usages, quelle que soit l'attitude des usagers. Par exemple, un couple partant en week-end ne fera pas le même choix de moyen de transport selon qu'il pourra bénéficier d'une voie rapide sur toute la longueur du trajet avec place de stationnement gratuite à l'arrivée, ou que la route est en mauvais état, avec une vitesse de circulation limitée à 50km, un parking payant à l'arrivée, et une alternative ferroviaire abordable et confortable sur le même trajet. **L'impact ne sera pas le même**, que ce soit en termes de sécurité, de pollutions locales, d'émissions de gaz à effet de serre, d'impact des infrastructures sur la biodiversité, sans compter les enjeux géopolitiques liés aux fournisseurs de matériel ou d'énergie, etc.
- **La conception peut fortement influencer le comportement des utilisateurs.** Par exemple, l'utilisation par un service numérique de designs addictifs issus des recherches en neurosciences (micro shots de dopamine réguliers provoqués par le système des notifications, scroll infini, etc.) et influence le comportement de ses utilisateurs. À l'inverse, il existe des modes de création

ayant des objectifs radicalement différents (notamment en open source) : il est possible d'offrir le même service en ayant recours à un design simple, non trompeur et non addictif. L'impact sur la consommation d'énergie et de matériaux s'en trouve également largement diminué..

- **Les choix techniques peuvent induire des verrouillages technologiques.** Par exemple, une offre de transport basée sur l'automobile et ses infrastructures attenantes plutôt que sur d'autres modes de transport plus collectifs impose aux gens d'utiliser une automobile pour se rendre dans certaines zones. Autre exemple, si le déploiement de services numériques dans de nombreux secteurs facilite certainement la vie d'un grand nombre de personnes, on constate souvent qu'en contrepartie, les services non numériques disparaissent, privant de fait les personnes sans matériel informatique, sans connexion internet, sans adresse de courriel ou mal à l'aise avec les outils numériques de l'accès à ces services..

Toute technique influence le contexte social, économique et technique dont elle est issue, et celui-ci l'influence en retour. Conscient de ces interactions, l'ingénieur peut ainsi tenir compte des conditions historiques et sociales de son développement, de sa mise en œuvre, de son utilisation ainsi que de ses conséquences³⁶.

Considérer que les choix techniques ne sont pas neutres, qu'ils sont politiques (c'est à dire relatifs à la société), ouvre une possibilité d'influence pour les acteurs de la technique. En effet, si les décisions stratégiques ne leur sont pas toujours accessibles, la manière de concevoir les systèmes techniques leur permet de choisir des trajectoires en faveur de la transition socio-écologique.

Par ailleurs, la société a besoin de solutions techniques les plus résilientes possibles. Il est entendu que la technologie ne résoudra pas tout, mais que les techniques au sens large (évaluation, conception d'objets, de processus et de services, mise en œuvre, gouvernance) peuvent prendre leur rôle dans la nécessaire transition socio-écologique. Il est plus pertinent de faire un choix politique ou financier en choisissant une solution peu carbonée déjà disponible et éprouvée, plutôt qu'en se reposant sur d'hypothétiques innovations futures. Parmi les exemples de besoins, on peut citer : de nouveaux outils méthodologiques comme l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre ou les impacts sociétaux, les produits et services bas carbone et durables, qui contribuent aux réductions des inégalités, à la conservation ou au développement de la biodiversité, à la résilience des organisations et de la société, à l'adaptation au changement climatique, à la réduction de la dépendance des individus face aux outils technologiques...

Détenteurs d'un savoir technique fondamental, les ingénieurs peuvent se faire animateurs du lien entre technique et société. En effet, en analysant scientifiquement les impacts directs et indirects des choix à faire, en concevant de la manière la plus responsable possible leurs conclusions et en les vulgarisant, ils peuvent favoriser une prise de décision éclairée.

36. Langdon Winner, "Do Artifacts Have Politics?", Daedalus, vol. 109, no. 1, 1980, pp. 121-136. (consulté le 21/01/2021)

Former l'ingénieur à penser et agir pour la transition

1 – Des formations d'ingénieur répondant aux nouveaux besoins de la société

Dans un contexte de crise systémique, et au regard du rôle majeur de l'ingénierie dans notre économie et notre société, **réformer les formations des ingénieurs représente un levier majeur pour transformer les infrastructures, les objets, les services et les processus** pour les rendre plus résilients et moins carbonés possibles. Parmi les outils que les formations d'ingénieur peuvent apporter à leurs futurs diplômés, on peut notamment citer la manière dont les impacts des productions et des usages sur notre système Terre et sur la société peuvent être évalués, ou les critères utilisables pour arbitrer entre divers choix techniques.

Pour essayer de déterminer les futurs besoins en ingénierie, les travaux de prospective sont incontournables. Le Plan de Transformation de l'Economie Française (PTEF) du Shift Project, dont les différents résultats ont été publiés en 2021 et 2022, est l'un d'entre eux. Il propose des plans opérationnels pour décarboner une quinzaine de secteurs clés de l'économie. La méthodologie choisie vise à assurer une cohérence d'ensemble entre les différents secteurs traités, à la fois du point de vue des matériaux et de l'emploi, mettant les nécessaires reconversions professionnelles au cœur de la réflexion. On trouvera ci-dessous un aperçu de quelques-unes des grandes conclusions du plan qui toucheront nécessairement l'ingénierie :

- ▶ **Le logement** doit particulièrement mettre l'accent sur une rénovation énergétique à grande échelle des logements existants, une décarbonation totale de la production de chaleur, une plus grande sobriété énergétique des logements neufs, et l'utilisation du bâtiment comme puits de carbone, via l'utilisation de matériaux biosourcés, y compris pour la rénovation.
- ▶ **L'industrie automobile** doit s'atteler à alléger les véhicules et améliorer leur aérodynamisme, à décarboner le plus possible leur fabrication et leur usage. Des filières françaises devraient se développer dans le retrofit électrique, les filières des cycles et des microvoitures.
- ▶ **Le fret** doit lui aussi répondre aux enjeux climat-énergie, notamment par une formation de ses acteurs à ces enjeux, l'adaptation des infrastructures au changement climatique, le report modal du fret longue distance vers le ferroviaire et le fluvial, l'électrification des camions et la baisse de leur consommation énergétique (aérodynamisme, vitesse réduite), un remplissage optimisé des véhicules de fret et, en zone urbaine, la mutualisation des flux de marchandises et le développement de la cyclologistique.

▶ **Le secteur de la santé**, les bilans d'émissions et énergétiques sont à généraliser, ainsi qu'une bonne compréhension et évaluation des flux physiques nécessaires au secteur. Une politique d'achats et de maintenance responsables et durables des produits de santé doit être mise en place, ceux-ci devront donc avoir les bilans les plus responsables possibles. La gouvernance est d'une importance particulière dans ce secteur dans lequel les co-bénéfices santé-climat et réduction des inégalités doivent être pris en compte, ainsi que les enjeux de priorisation entre santé, sécurité, qualité et coût carbone. Le secteur de la santé doit mieux former ses personnels aux enjeux énergie-climat, mieux évaluer ses flux physiques, systématiser les bilans d'émissions de gaz à effet de serre et réduire fortement les émissions de ses secteurs les plus émetteurs (achats, déplacements, bâtiments). Une politique d'achats et de maintenance responsables et durables des produits doit être mise en place. Une gouvernance adaptée est particulièrement importante, prenant en compte les co-bénéfices santé-environnement et les enjeux de priorisation entre santé, sécurité, qualité et émissions de carbone.

▶ **Le secteur de la culture** doit relocaliser ses activités, en inscrivant davantage la culture dans au cœur des territoires et en en faisant un moteur de la transition locale. Ralentir la production est également un levier de décarbonation efficace, qui peut être bénéfique à la création. Le renoncement à certaines pratiques et opportunités technologiques carbonées, comme la diffusion en Ultra Haute Définition, la réalité virtuelle, le développement du cloud-gaming... doivent être encouragées. La rénovation des bâtiments, la décarbonation et la réduction de la mobilité des œuvres, du matériel, des artistes et du public, la réduction des jauges et des dispositifs techniques, l'écoconception des œuvres sont aussi à prévoir.

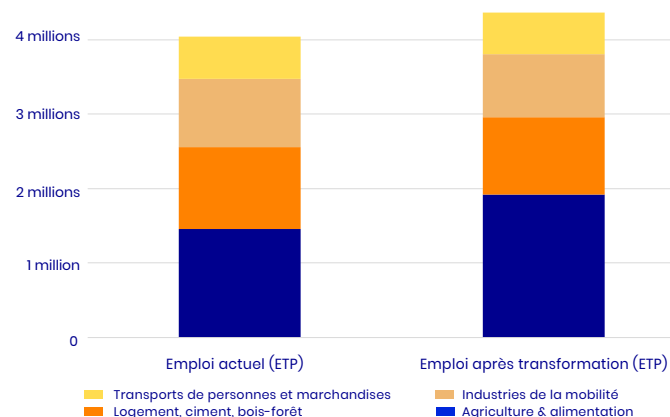
De nombreuses formations visent avant tout à former des personnes rapidement employables. Dans le contexte d'un monde de plus en plus changeant, d'enjeux et de risques liés au système technique croissants, il est indispensable d'adopter une vision à moyen et long terme des emplois. **Il s'agit donc de continuer à former des ingénieurs pour répondre aux besoins d'emplois aujourd'hui, mais aussi d'anticiper les besoins d'emploi de l'économie bas carbone et d'accompagner la nécessaire transformation des compétences, pour ainsi contribuer à rendre la société résiliente sur le long terme.** Le Plan de Transformation de l'Economie Française inclut, dans son étude, une évaluation des transformations d'emploi,

L'URGENCE ÉCOLOGIQUE : UN DÉFI D'UNE AMPLEUR SANS PRÉCÉDENT POUR L'HUMANITÉ

y compris en termes de passage d'un secteur à un autre, qui seront nécessaires d'ici 2050 pour sa mise en œuvre. **Il conclut à la nécessité d'une planification**, y compris des reconversions professionnelles, si l'on souhaite éviter de trop lourds impacts sociaux :

DEMANDE DE MAIN-D'ŒUVRE À 2050 : PROSPECTIVE GLOBALE

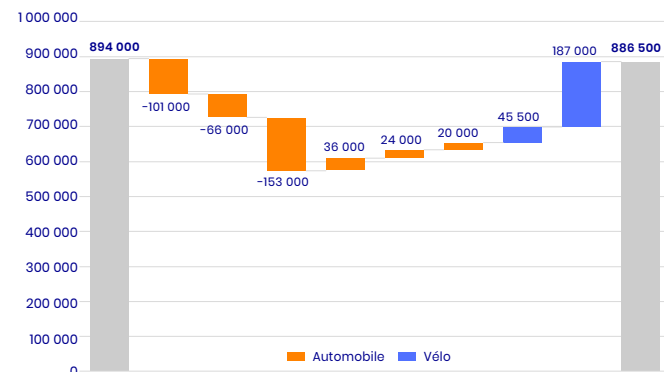
Source : The Shift Project, 2022



Le secteur de la mobilité est un bon exemple de la transformation des besoins en compétences :

DEMANDE DE MAIN-D'ŒUVRE COMPARÉE DES SYSTÈMES AUTOMOBILE ET VÉLO

Source : The Shift Project, 2022



Les employeurs recherchent de plus en plus souvent des candidats dotés de compétences opérationnelles pour mener une transition socio-écologique à leur niveau, tout comme les collectivités qui doivent satisfaire à un nombre croissant de dispositifs réglementaires, souvent liés à la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). Même si toutes les entreprises ne s'engagent pas au même rythme dans une transition écologique, différentes enquêtes démontrent l'importance grandissante que ce sujet prend pour les salariés en poste et les jeunes diplômés :

- ▶ Pour 91 % des salariés considèrent que, la transition écologique est un sujet important dans les entreprises françaises en général, et 43 % le jugent prioritaire. Les salariés sont à peine moins enthousiastes lorsqu'il s'agit de leur propre organisation puisque 88 % estiment qu'il s'agit d'une préoccupation importante pour leur propre organisation.³⁷
- ▶ 78 % des salariés choisiraient, à offres équivalentes, de rejoindre une entreprise engagée pour la transition écologique.³⁸
- ▶ Du côté des jeunes diplômés, les secteurs les plus attirants sont l'environnement (76 %) et l'énergie (62 %)³⁹ et 62 % d'entre eux sont prêts à « refuser un poste dans une entreprise qui manque d'engagement social/environnemental ».

Même si le monde de l'entreprise n'a pas encore fait sa transition, il semble qu'un mouvement soit enclenché : une Convention des Entreprises pour le Climat⁴⁰ a été créée, et les échanges du Shift Project avec différentes entreprises, en particulier celles de la fédération professionnelle Syntec-ingénierie ayant signé une charte climat, corroborent le constat d'une indispensable évolution des formations d'ingénieur pour y intégrer des compétences opérationnelles liées à la transition socio-écologique.

De nombreux enjeux sont encore peu pris en compte par les entreprises, et requièrent de nouvelles compétences et la capacité à travailler en interdisciplinarité. Les impacts des activités de production sur la biodiversité sont par exemple encore peu évalués, malgré leur importance cruciale.

Enfin, si la société a besoin des nouvelles compétences techniques, les conséquences des choix techniques dépassent la technique seule, et les futurs ingénieurs doivent être en mesure de mobiliser des compétences liées aux Sciences humaines et sociales (SHS) afin d'en appréhender les impacts pour la société et l'environnement. Évaluer les impacts sociaux du choix d'un nouveau fournisseur, réaliser des arbitrages vis-à-vis de choix techniques ayant des impacts non comparables (changement climatique, biodiversité, impacts sociaux & sociétaux...) seront autant de situations où ils seront amenés à sortir d'un cadre purement technique.

2 — L'urgence à se transformer pour être à la hauteur des enjeux, une course contre la montre

Face au calendrier que nous impose les crises écologiques, en particulier climatique, face à l'inertie de l'enseignement supérieur, il est impératif de commencer à transformer les formations sans plus tarder : il n'y a plus de temps à perdre.

37. CSA, « Les salariés et la transition écologique dans les entreprises », consulté le 22 février 2022

38. CSA.

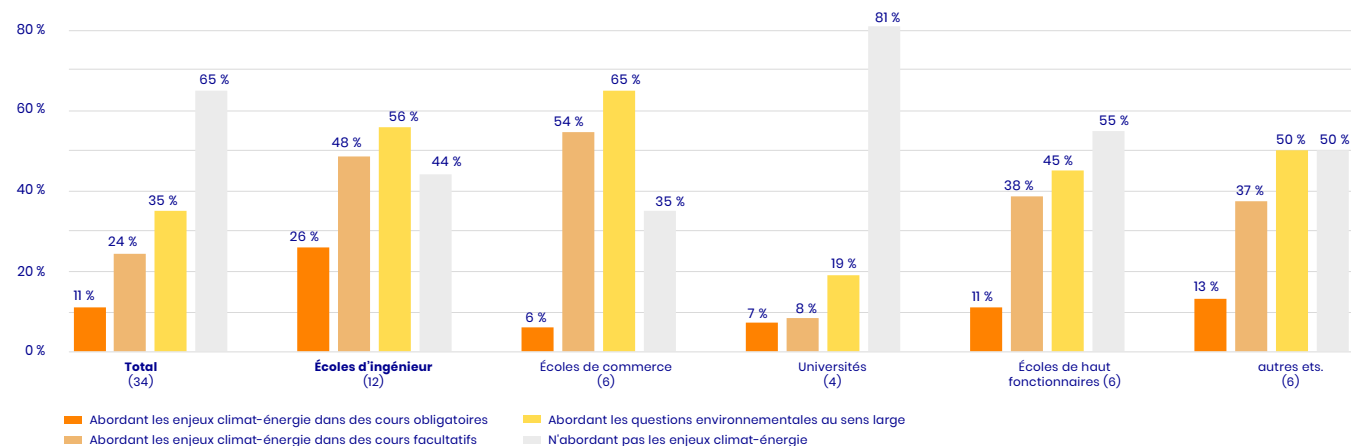
39. « Baromètre BCG-CGE-Ipsos - Talents - ce qu'ils attendent de leur emploi », 2021.

40. Cec-impact.org

En 2019, **seules 11% des formations abordaient les enjeux climat-énergie dans leur tronc commun**⁴¹, selon le rapport « *Mobiliser l'Enseignement supérieur pour le climat* »⁴² du Shift Project.

PART DES FORMATIONS ABORDANT LES ENJEUX CLIMAT-ÉNERGIE

Source : The Shift Project, 2019



Par ailleurs, en dépit d'une offre croissante de formations spécialisées, **de grandes disparités existent entre les catégories d'établissements**.

Ainsi, les enjeux énergie-climat ne sont abordés que par un petit nombre de formations universitaires (8 % des formations). Ce sont les écoles de commerce et d'ingénieurs qui en proposent le plus, avec respectivement 54 % et 48 % des formations qui en proposent. Mais ces modules ne sont pas toujours obligatoires : seulement 26 % des formations d'ingénieurs proposent des cours obligatoires sur ces enjeux. Une analyse plus fine montre que le plus souvent, ces modules relèvent uniquement de filières spécialisées dans les questions « environnementales », ce qui signifie qu'en fait, un grand nombre d'étudiants achève leur parcours de formation sans avoir abordé ces enjeux.

Un état des lieux très fin, conduit sur les établissements du Groupe INSA, confirme cette tendance, malgré l'engagement de longue date de certains établissements du Groupe, notamment pour former des « ingénieurs humanistes » (voir les *Retours d'expériences* dans un ouvrage séparé).

L'appel à former tous les étudiants du supérieur aux enjeux climatiques et écologiques, lancé en 2019 par The Shift Project, a été signé par plus de 9 000 citoyens, dont 170 dirigeants d'établissements et 1 200 enseignants. Il appelle notamment à ce qu'aucun étudiant ne puisse valider une formation dans l'enseignement supérieur sans avoir compris les causes, les conséquences du changement climatique et travaillé, à son niveau, à l'identification de solutions possibles.

Le besoin d'intégrer les enjeux socio-écologiques de manière obligatoire dans le tronc commun est une nécessité pour que tous les secteurs de la société soient en mesure de les prendre en compte à la bonne échelle. Les filières de spécialités doivent également reprendre ces enjeux, et faire évoluer leurs enseignements.

Ces évolutions requerront des années pour aboutir : plusieurs mois seront nécessaires pour réaliser un état des lieux de l'existant ; plusieurs mois supplémentaires seront indispensables pour adopter un socle commun de connaissances et de compétences, et il faudra encore plus de temps pour former et recruter les personnels. Pour des parcours de formation durant entre 3 et 5 ans, **il faut s'attendre à ce qu'un tel programme exige de l'ordre de 7 ans, voire plus, pour réussir à produire des diplômés qui soient en capacité de comprendre et d'agir en faveur de la transition socio-écologique.**

Par ailleurs, une fois en poste, il peut s'écouler plusieurs années avant que les futurs diplômés se trouvent en position de contribuer effectivement à la transformation écologique, du fait de l'inertie des entreprises pour redéfinir leur stratégie, puis la mettre en place. Réformer les formations doit donc être réalisé dès maintenant.

41. Ce chiffre est issu d'une analyse chiffrée des formations de 34 établissements (12 écoles d'ingénieur, 6 écoles pour fonctionnaires, 6 écoles de commerce, 4 universités et une sélection de 6 autres établissements). Les établissements analysés représentent 2450 formations (hors BTS, DUT et CPGE) et près de 300 000 étudiants – soit un peu plus de 11 % des 2,68 millions d'étudiants du pays.

42. The Shift Project, « *Mobiliser l'Enseignement supérieur pour le climat* », mars 2019. Consulté le 15/01/2021.

En outre, 43 % d'ingénieurs diplômés n'exercent pas un métier d'ingénieur : leurs actions se déploient donc souvent dans des métiers non techniques. Faire évoluer les compétences des jeunes diplômés ingénieurs permet donc de faire évoluer les pratiques d'autres métiers. Déployer de nouveaux enseignements en école d'ingénieurs alimentera également la nécessaire réforme de la formation continue, qui devra également jouer un rôle majeur pour accompagner la mise à jour des connaissances et compétences des actifs en poste. Cette stratégie se répercutera également sur la recherche, les entreprises, d'autres établissements partenaires... En résumé, l'ensemble de l'économie bénéficiera de l'évolution des formations.

Il y a donc urgence à intégrer structurellement les enjeux socio-écologiques dans les formations du supérieur en général, et les écoles d'ingénieur en particulier.

3 — Des formations tenant compte de nouveaux phénomènes psychosociaux

60 % des jeunes sont « très » voire « extrêmement » inquiets du changement climatique. 45 % d'entre eux déclarent que leur « éco-anxiété » se manifeste dans leur vie quotidienne. Une enquête⁴³ menée sur 10 000 personnes âgées de 16 à 25 ans dans le monde entier révèle ces chiffres inquiétants et dévoile certaines de leurs causes : craintes de répercussions directes du changement climatique sur leur vie, sentiment d'impuissance, manque de confiance dans l'action des gouvernements. Nos échanges avec de nombreux enseignants suggèrent que nombre d'enseignants en souffrent également.

Du côté des employés, une enquête menée avant la pandémie de Covid-19 montrait déjà que **51 % des cadres jugent « très important » d'exercer un métier qui a du sens**⁴⁴. Différentes notions tentent de nommer les mal-être liés au travail : épuisement professionnel (*burn-out*, *bore-out*), démission intérieure (*brown-out*), « emplois à la con » (*bullshit jobs*)...

Pour réduire son éco-anxiété, un moyen efficace consiste à « passer à l'action », est de en prenant une part active à essayer de contrôler ces enjeux effrayants, et en donnant plus de sens

à son activité : dans son activité professionnelle, il s'agit d'agir pour que les enjeux socio-écologiques soient intégrés dans son métier. Les formations y contribueront en donnant aux étudiants les moyens de ce passage à l'action – dans le cas des futurs ingénieurs, ces moyens seront principalement intellectuels.

Face à ces difficultés, diverses mobilisations apparaissent en France et ailleurs : manifestations appelant l'État à respecter ses engagements climatiques, ou dénonçant des pollutions ou des autorisations de construction qui iraient contre l'intérêt général ; engagements publics ; création d'associations d'étudiants, d'alumni, d'entreprises, d'entrepreneurs... La consultation nationale étudiante 2020 relevait que 69 % des étudiants aspirent à une formation en adéquation avec l'urgence environnementale, et souhaitent être davantage formés aux enjeux environnementaux.

Au-delà de l'enjeu des compétences pour les acteurs économiques, on oublie souvent que les établissements d'enseignement supérieur, qu'ils soient publics ou privés, sont largement financés par l'État. Au-delà de l'impératif « naturel » d'employabilité des diplômés, les établissements devraient avoir dans leurs missions de contribuer à l'intérêt général, et à l'atteinte des objectifs écologiques nationaux

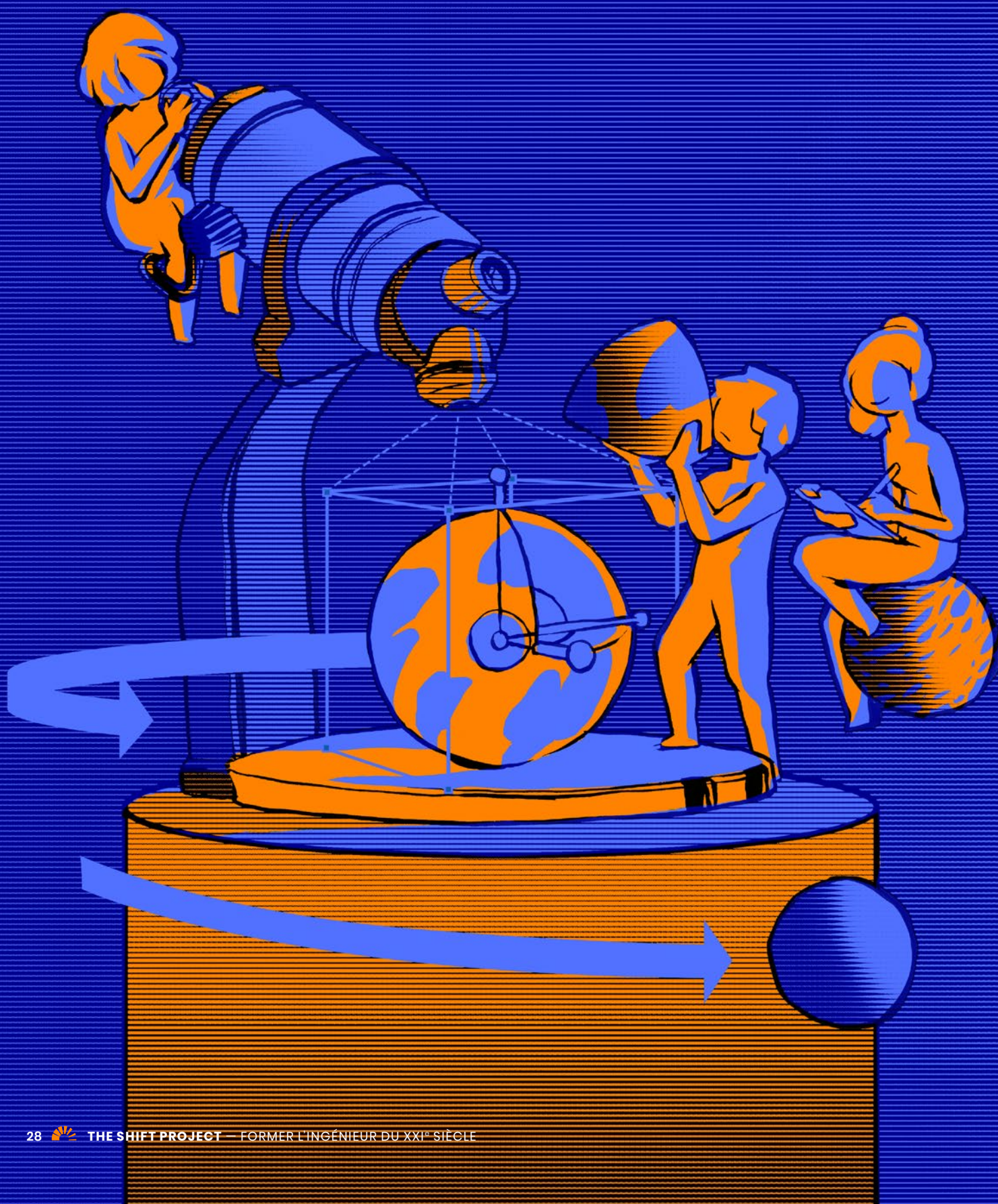
Que ce soit du point de vue des établissements du supérieur en général, ou des écoles d'ingénieurs en particulier, **il y a un consensus sur la nécessité de transformer les formations au plus vite**. En témoignent l'appel du Shift Project de 2019, les centaines d'entretiens menés lors des projets ClimatSup en 2018-2019 et ClimatSup INSA en 2020-2022, les recommandations du groupe de travail confié à Jean Jouzel par madame la Ministre Frédérique Vidal, et les mobilisations et manifestes de nombreuses parties prenantes de l'ESR.

Transformer les formations d'ingénieur pour y intégrer structurellement les enjeux socio-écologiques, c'est répondre à un besoin urgent sur lequel il y a consensus.

43. Elizabeth Marks et al., « Young People's Voices on Climate Anxiety, Government Betrayal and Moral Injury: A Global Phenomenon », SSRN Scholarly Paper (Rochester, NY: Social Science Research Network, 7 septembre 2021).

44. APEC, « Quête de sens au travail : une responsabilité de l'entreprise ? », 2020.

45. RESES, « Consultation Nationale Etudiante – RESES », 6 avril 2021.



CHAPITRE 2

Birfurquer vers une société résiliente

QUEL RÔLE POUR LES INGÉNIEURS ?



Un basculement vers une société plus souhaitable s'impose. Parmi les grands objectifs à considérer, citons notamment le besoin de décarboner l'économie et de rendre cette société résiliente. Outre la connaissance et la compréhension fine des enjeux socio-écologiques, l'ingénieur devrait certainement appréhender cette société du risque dans toute sa complexité. **Le recours à la science est la condition de visibilité et d'analyse de ces risques. Cela pourrait également inclure les considérations physiques et sociales qui déterminent les choix sous-jacents à la gestion des risques.**

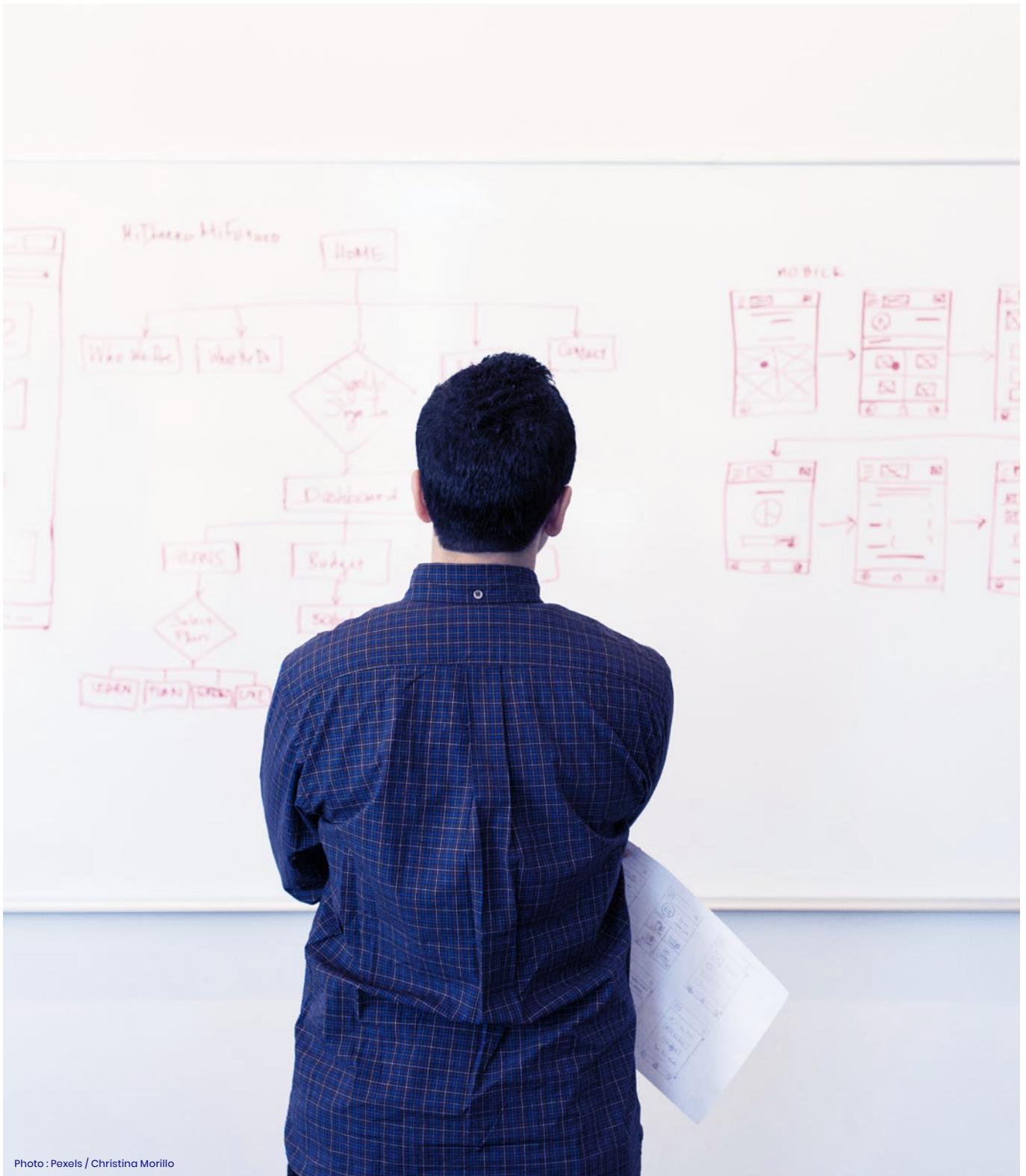


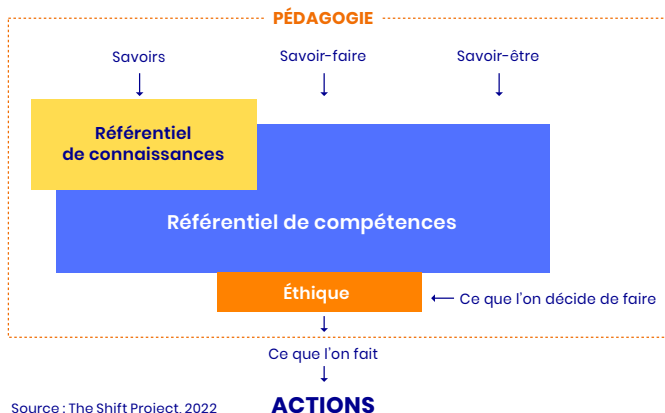
Photo : Pexels / Christina Morillo

Quels ingénieurs pour piloter ces trajectoires ?

De quels ingénieurs avons-nous besoin ? Quelle place et quel rôle peut-il ou doit-il avoir dans la société ? Ces questions ne sont pas nouvelles mais n'ont pas encore bénéficié de l'écho qu'elles méritent. Ainsi, depuis quelques dizaines d'années, le comité « Former l'Ingénieur Citoyen » de l'association Ingénieur Sans Frontières, réfléchit à ces questions, propose des réponses et invite à en débattre, notamment via son manifeste⁴⁶.

L'approche empruntée par Ingénieur Sans Frontières, d'autres structures et désormais The Shift Project, est une invitation à redéfinir collectivement le rôle de l'ingénieur. **Ainsi, plutôt que d'incarner une figure d'autorité scientifique et technique, l'ingénieur assumerait un rôle d'interface entre science et technique, en se positionnant comme animateur des choix techniques collectifs.**

De quels savoirs, savoir-être et savoir-faire l'ingénieur a-t-il besoin pour agir en tenant compte des enjeux socio-écologiques ?



L'ingénieur agit grâce à un ensemble de connaissances, surtout scientifiques et techniques, de compétences, notamment techniques, et de savoir-être⁴⁷.

Afin d'esquisser les grandes lignes de ce que pourrait être un ingénieur en mesure de répondre aux enjeux socio-écologiques, par exemple en pilotant de façon cohérente les orientations technologiques, **nous avons identifié un ensemble d'objectifs d'apprentissage, constitué à la fois de compétences** (première sous-partie) **et de connaissances fondamentales** (deuxième sous-partie); **et de conséquences sur la culture de l'ingénieur.**

Ce travail est restitué dans un référentiel d'objectifs d'apprentissage, synthétisé sous forme d'infographie (ci-après). Il a été réalisé en co-construction avec 150 contributeurs : enseignants d'établissements de Groupe INSA, enseignants d'autres écoles d'ingénieur et d'autres formations, directions d'établissements, institutions de l'ESR, experts et scientifiques, associations, étudiants et entreprises.

Dans une étude réalisée pour le projet par The Shift Project et Alumni for the planet (disponible sur la page du projet) auprès de plus de 1000 ingénieurs en poste, **78 % des ingénieurs interrogés estiment que leurs études supérieures ne les ont pas du tout ou pas tellement formés à ces enjeux, et 95 % considèrent qu'ils devraient figurer en formation initiale d'ingénieur.**

À noter

Ce référentiel a été développé pour proposer des pistes d'évolution des formations d'ingénieur. Nombre d'entre elles peuvent certainement s'adapter à d'autres formations. D'autres référentiels existent, parmi lesquels :

Collectif FORTES, Manuel de la Grande Transition, Les Liens qui Libèrent, 2020

CGE-CPU, Référentiel DD&RS 2021

CGE-CPU, Guide Compétences Développement Durable & Responsabilité Sociétale, 2019

Institut Mines-Télécom, Référentiel de compétences, 2021

46. Ingénieurs sans frontières « Manifeste pour une formation citoyenne des ingénieure.s », Disponible en ligne (consulté le 21/01/2021)

47. Conscients de simplifier les différents concepts de connaissance et de compétence, nous avons davantage l'objectif de faire comprendre l'articulation des différentes parties du référentiel et l'importance des approches pédagogiques dans leur enseignement, que de s'atteler à redéfinir longuement et précisément les différents débats sur ces notions.

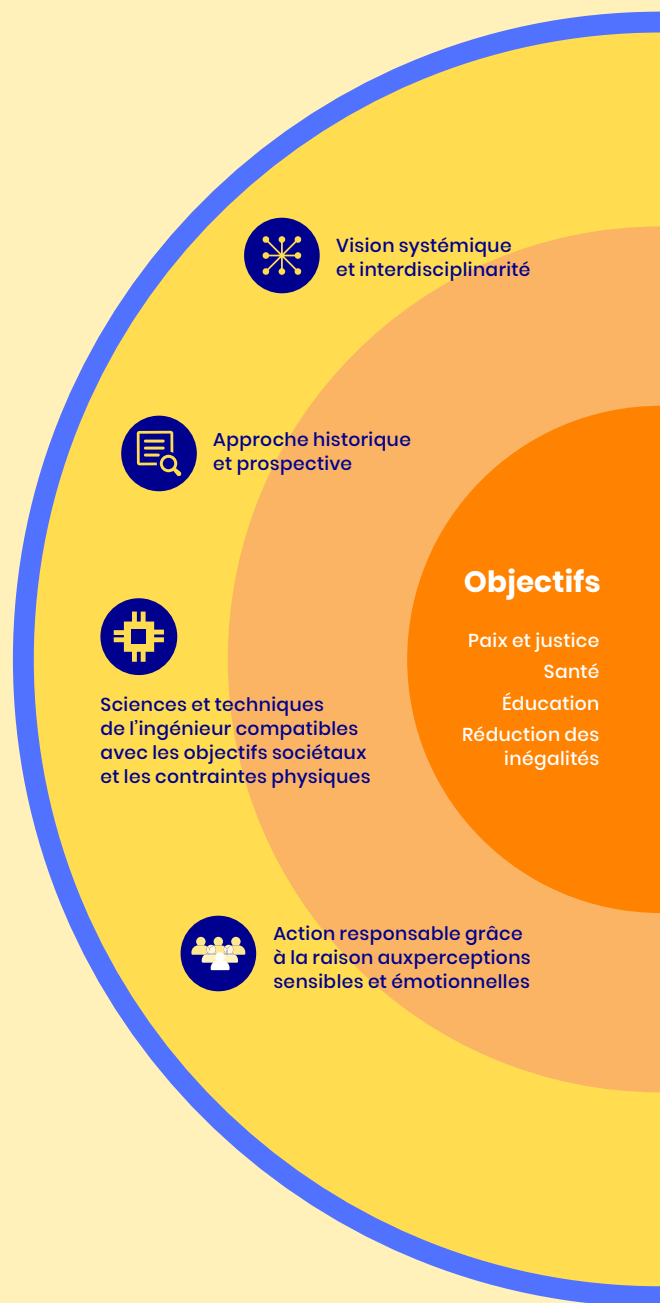
Former l'ingénieur



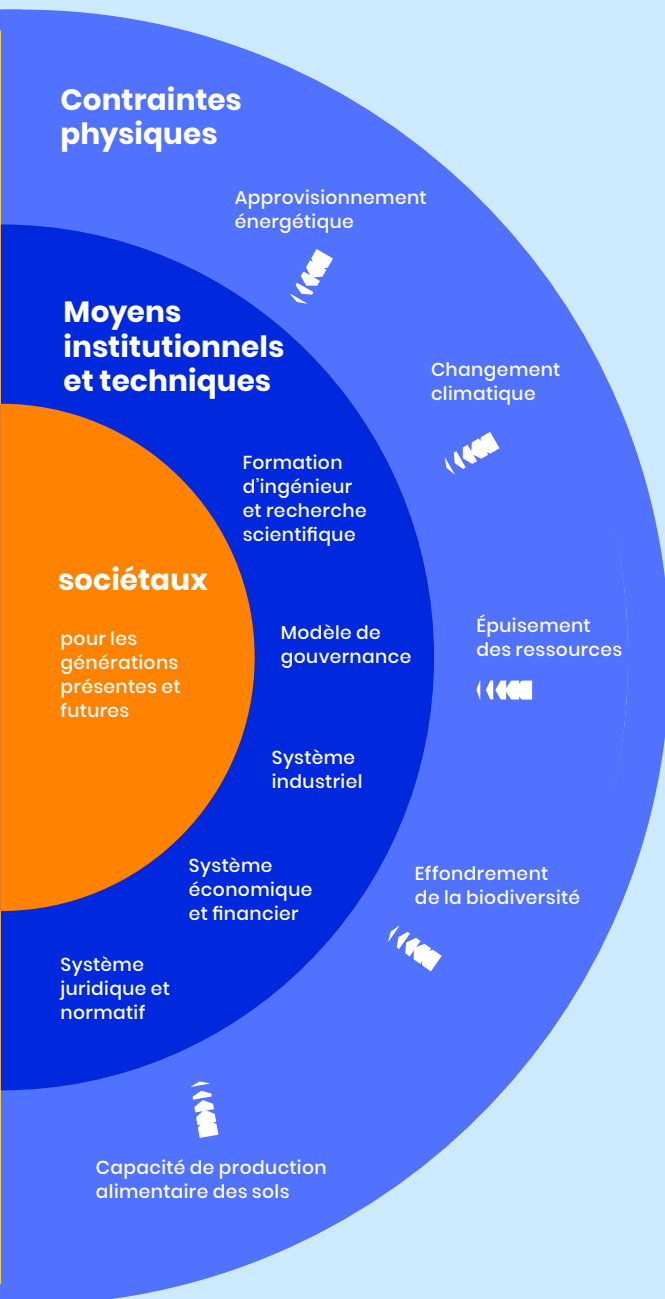
L'INGÉNIEUR CITOYEN DU XXI^e SIÈCLE

Les compétences de l'ingénieur

L'ingénieur s'inscrit dans le monde et dans nos sociétés et peut agir en qualité de citoyen. Différentes compétences lui permettent de mobiliser pertinemment sa connaissance des enjeux afin de relever le défi de la transition socio-écologique. L'adoption d'une approche systémique et interdisciplinaire lui permet de conserver une vue holistique de la crise et des réponses à lui apporter et ainsi d'orienter sa réflexion. L'analyse des constructions et des choix passés lui permet de mieux appréhender la situation actuelle et d'imaginer des trajectoires souhaitables. Ayant saisi l'influence des sciences et des techniques sur les sociétés, il est capable de les mobiliser en toute conscience en évaluant les impacts des choix techniques et en concevant pour la résilience. Enfin, son sens des responsabilités, sa pensée critique et son attention à ses émotions et à ses sensations lui permettent d'agir avec éthique au niveau individuel et dans le cadre collectif de son organisation.



du XXI^e siècle



LES ENJEUX DE LA TRANSITION SOCIO-ÉCOLOGIQUE

Les connaissances de l'ingénieur

Les trois disques concentriques bleu, violet et rouge décrivent les enjeux socio-écologiques que l'ingénieur du XXI^e siècle doit comprendre et connaître.

Les contraintes physiques s'imposent aux sociétés humaines et à l'ingénieur (changement climatique, effondrement de la biodiversité, ressources planétaires limitées, etc.). Les moyens institutionnels et techniques (modes de gouvernance, système industriel...) sont les leviers à la disposition des sociétés humaines pour répondre à des objectifs sociétaux définis collectivement, qui sont des fins à viser pour les sociétés humaines, tout en tenant compte des contraintes physiques.

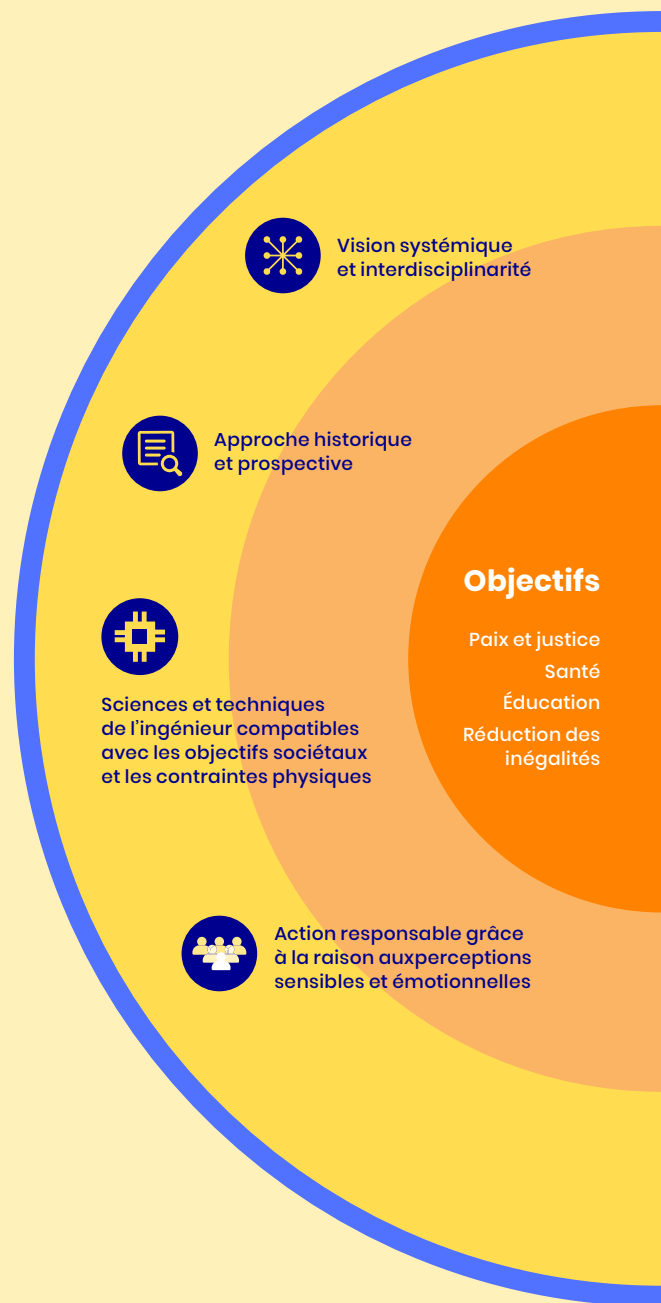
Pour donner une première vue générale de la problématique, une introduction à ces enjeux est proposée sous le terme d'«Introduction à l'anthropocène» (non visible sur cette infographie, car la notion est transversale, elle est cependant abordée plus loin dans le document).

L'ingénieur doit comprendre les enjeux socio-écologiques dans toute leur dimension systémique afin de distinguer les faits physiques des choix humains, et identifier les leviers qui sont à sa disposition pour agir en faveur d'une société décarbonée et résiliente.

Source : The Shift Project, 2022

Les compétences pour l'ingénieur du XXI^e siècle

Les **objectifs d'apprentissage** présentés dans cette partie se rapportent surtout à des compétences, savoir-faire, savoir être et se divisent selon la structure suivante. Un premier niveau de détail est donné pour chacune des sous-catégories, afin d'en donner l'esprit plus qu'une description exhaustive. La présente proposition n'a **aucune ambition d'universalité et doit être mise en débat** dans chacune des écoles qui souhaitent se l'approprier. Nous avons également détaillé chacune des sous-catégories (connaissances et compétences) afin de présenter les notions incontournables et proposer des exemples et ressources documentaires, dans un fichier disponible en annexe.



1 | Vision systémique et interdisciplinarité

- 1.1 Adopter une **approche systémique** 36
- 1.2 **Articuler les savoir-faire** de différents champs disciplinaires dans un contexte de décision ou d'action 38

2 | Approche historique et prospective

- 2.1 Comprendre les limites de l'**anthropocène** et ses conséquences sur notre présent : enjeux socio-écologiques 39
- 2.2 Analyser les **récits dominants et alternatifs** en vue d'ajuster nos représentations 40
- 2.3 Comprendre les scénarios existants et être capable d'engager une **démarche prospective** 41
- 2.4 Tenir compte des **risques et incertitudes** dans les scénarios 41

3 | Sciences et techniques de l'ingénieur compatibles avec les objectifs sociétaux et les contraintes physiques

- 3.1 Maîtriser les **outils d'évaluation multicritères** et transformer les outils existants 43
- 3.2 Inscrire un produit, un procédé dans une **démarche responsable** et pouvoir en identifier les limites 44
- 3.3 Maîtriser, critiquer et faire évoluer les **méthodes de management** 45

4 | Action responsable grâce à la raison et les perceptions sensibles et émotionnelles

- 4.1 Identifier les sphères de responsabilité et gouverner dans l'intérêt général 47
- 4.2 S'appuyer sur ses sensations physiques et sur ses émotions et s'inspirer des arts et de la culture 47
- 4.3 S'appuyer sur la pensée critique et faire preuve de réflexivité 49



OBJECTIF 1

Vision systémique et interdisciplinarité

C'est avant tout un « **objectif d'échelle** ». L'idée est de réussir à articuler les différentes échelles (au niveau des systèmes, des territoires, des disciplines...), notamment pour être capable d'analyser les interactions en jeu et d'animer les débats avec d'autres acteurs en lien avec les techniques.

1.1 — Adopter une approche systémique

signifie traiter les éléments d'un problème dans leur ensemble (englober) et les interactions entre ces éléments (associer). Tout particulièrement, l'ingénieur peut prendre en compte les interactions entre le système technique, le système humain et le système naturel. Pour bien intégrer les enjeux de la biosphère, il importe d'être capable de modéliser le comportement de systèmes dynamiques complexes, ne réagissant pas comme des machines ou des modèles simplistes (effets de seuils pour la disparition d'une espèce, interactions très nombreuses entre espèces, dont une grande partie est inconnue ou non modélisable). On peut également réfléchir en termes de flux et de stock. Le but étant de pouvoir gérer la complexité d'une situation et de déterminer les conséquences d'une action à différentes échelles spatiales et temporelles (voir Objectif 2), de faire des allers-retours entre une problématique locale et les enjeux globaux.

Par exemple

- Définir le système dans son ensemble et enquêter sur les interactions qui s'y produisent dans son contexte professionnel : le système-Terre (géosphère), les humains (anthroposphère), les activités et productions humaines (technosphère) et le vivant (biosphère). Cela peut permettre une lecture plus lucide des enjeux et des interactions principales entre l'humain et son environnement au sens large.

Ressources

Donella Meadows « *Thinking in Systems* »

Techniques de l'ingénieur
« *Dynamique des systèmes complexes* »

Nicolas Raillard, *Audition #4 – Scénarios énergétiques et vision systémique*

Pour aller plus loin

Université Johns-Hopkins, *Systems Thinking In Public Health*

En support de TP – **Logiciel Vensim** – simulation software : vensim.com (licence étudiante libre) pour faire les *causal loop diagrams* et les *stock and flow diagrams*



Photo : INSA Lyon © Nicolas Robin

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ Analyser un modèle de système complexe tel que World3 (rapport Meadows) ;
- ▶ Apprendre les caractéristiques des systèmes dynamiques complexes et trouver ensemble en classe des exemples de ces caractéristiques dans la vie réelle : boucle de rétroaction, importance du chemin, de l'histoire, réseaux invariants d'échelle, comportements émergents...
- ▶ Mener une étude de cas-type comme par exemple « 5G : plus ou moins consommateur d'énergie que la 4G ? Quel rapport coûts / bénéfices du point de vue de la société et de la crise écologique ? ». Effectuer une modélisation du système de type *Causal Loop Diagram* pour comprendre la dynamique du système et quelles actions peuvent être entreprise pour la stabiliser.
- ▶ Atelier « Exploration vers un design régénératif », invitant à explorer différentes notions allant des services écosystémiques aux analyses de cycle de vie, en s'appuyant sur différents exemples qui seront évalués au prisme d'outils telle que la "Matrice d'Identification des Services Écosystémiques dans le Cycle de Vie" – INSA Rouen, département Mécanique.
- ▶ Étudier les Objectifs de Développement Durable (ODD) : une véritable boussole pour comprendre l'interconnexion entre des systèmes naturels et sociaux complexes.
- ▶ S'initier à une vision systémique dans le domaine de la biologie : approche multi-échelle des systèmes vivants (de la cellule aux écosystèmes), de leurs niveaux d'organisation, de leurs interactions (échanges et relations entre individus, entre espèces, ...), des fonctionnalités individuelles et collectives (vers les services écosystémiques). Application possible dans les domaines de l'urbanisme : comparaison entre l'habitat naturel et la ville pour penser la construction, le quartier, la ville en tant que système régénératif, à l'instar de l'écosystème.
- ▶ Présenter une colonne de distillation de pétrole : toute notre société dans les différents produits du pétrole ! Comprendre que sans essence pas de diesel, sans plastique pas de fioul, sans asphalte pas de chimie du pétrole, etc. INSA Lyon, département Génie Mécanique.

1.2 — Articuler les savoirs de différents champs disciplinaires dans un contexte de décision ou d'action

c'est-à-dire, mobiliser des champs disciplinaires pertinents, hors de son champ d'expertise, ou savoir identifier et agir en animateur avec des experts de ces champs afin d'intégrer leurs évaluations et recommandations au processus de conception/décision, si pertinent. L'ingénieur reste un expert technique avec des bases scientifiques solides. Il peut s'appuyer sur d'autres disciplines scientifiques afin de piloter au mieux les développements technologiques.

Exemples :

- ▶ La gouvernance par les communs et le déplacement de l'ingénieur du rôle d'expert à celui d'animateur de cette gouvernance des techniques peut permettre cette prise de recul de l'ingénieur et une meilleure prise en compte des externalités.
- ▶ Intégrer un biologiste à la conception d'un bâtiment, au développement d'une nouvelle colle, etc.
- ▶ Travailler avec un neuroscientifique et un éthicien pour concevoir un nouveau logiciel dans le domaine de la santé.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ La création de laboratoires de recherche interdisciplinaire

Ressources

F. Kourilsky (dir.),

Ingénierie de l'interdisciplinarité, 2003

Michel Callon, « Des différentes formes de démocratie technique », 1998

Porte oikos, *Manuel de la Grande Transition* (pp. 84-91)

ou des collaborations plus poussées entre les laboratoires de recherche existants permettent d'enseigner directement le fruit des recherches dans une perspective interdisciplinaire. Voir les travaux de l'école urbaine de Lyon sur l'anthropocène.

- ▶ L'étude des controverses sociotechniques actuelles (la science en train de se faire) nécessite de mobiliser plusieurs disciplines scientifiques (physique, chimie, anthropologie, sociologie, épistémologie, etc.) et permet de comprendre les enjeux sociétaux dans le choix de trajectoires technologiques (controverse autour de la 5G par exemple). Voir le site du cours « Description de controverses » des Mines ParisTech qui recense de nombreuses études de cas.
- ▶ Travailler sur des projets transdisciplinaires avec des étudiants et/ou des enseignants provenant d'autres formations, chacun de ses représentants amenant une vision et des compétences propres : juristes, biologistes, philosophes, historiens, techniciens, architectes, gérants d'entreprise, etc. Des associations, citoyens et élus peuvent également participer. Voir par exemple le projet de recherche « SADeMMaR » (Sensibilisation- Accompagnement et aide à la Décision des Ménages dans le processus de Maintenance et Réparation) vise à supprimer les freins économiques, techniques, psychologiques et sociologiques à la réparation des biens d'équipements. Il regroupe des automaticiens, mécaniciens et informaticiens de l'INSA Hauts-de-France, des économistes et sociologues de l'Université Catholique de Lille, et des gestionnaires de l'Université de Lille. Participent également au projet des associations (repair cafés) et des professionnels de la réparation. Des projets sont aussi confiés à des étudiants de l'INSA et de master en design d'interaction.
- ▶ La formation à l'approche du biomimétisme à travers son cadre méthodologique permet d'incarner le nécessaire croisement de plusieurs disciplines : biologie, physique, chimie, design, etc. Rechercher dans la biologie des solutions alternatives durables à des problématiques techniques. Voir les travaux de thèse en conception innovante :

1/ <http://lcpi.ensam.eu/thematiques-de-recherche-114295.kjsp>
P.E Fayemi, ENSAM LCPI, *méthodologie de conception bio-inspirée pour l'ingénieur*

2/ **A. Letard, ENSAM LCPI Ceebios**, *rôle du designer et des sciences de la conception dans le biomimétisme*

3/ **E. Graeff, ENSAM LCPI**, *rôle du biologiste dans les équipes de conception biomimétique*

Pour aller plus loin

Cyril Lemieux, « À quoi sert l'analyse des controverses ? », 2007

Laure Flandrin, Fanny Verrax, « Quelle éthique pour l'ingénieur ? », 2019

E. Morin, *Introduction à la pensée complexe*, 1990



OBJECTIF 2

Approche historique et prospective

C'est avant tout un « **objectif d'échelle temporelle** », qui s'appuie sur l'histoire combinée à une approche sociologique notamment. Concevoir des stratégies de réponse aux enjeux socio-écologiques à court, moyen et long terme en prenant en compte les différents scénarios, analysés au regard des autres compétences.

2.1 — Comprendre les limites de l'Anthropocène et ses conséquences sur notre présent : enjeux socio-écologiques

A l'heure de la « Grande Accélération »⁴⁸ et des promesses technoscientifiques tournées vers le futur, historiciser ses réflexions et son travail afin de les ancrer dans des trajectoires techniques et sociales de plus long terme peut permettre d'évaluer la compatibilité des actions de l'ingénieur. (biosphère). Cela peut permettre une lecture plus lucide des enjeux et des interactions principales entre l'humain et son environnement au sens large.

Ressources

J. Treiner, *Fil conducteur pour une introduction à l'Anthropocène en début d'études supérieures*, 2021.

F. Gemenne, A. Rankovic
« *Atlas de l'Anthropocène* », 2021

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ Réaliser un arpentage (technique de lecture collective) sur des textes autour de l'Anthropocène – expérimenté à l'INSA Lyon
- ▶ Faire des études de cas ancrées sur le territoire, sur les conséquences engendrées par les activités humaines : voir le rapport The Shift Project, « *La stratégie de résilience des territoires pour tenir le cap de la transition écologique. Tome 1* » qui constitue une grande source d'exemples à développer.
- ▶ Analyser les développements technologiques dans le système thermo-industriel actuel notamment au regard des limites physiques planétaires (ex. double contrainte carbone) et sociales (ex. montée des inégalités).

Pour aller plus loin

C. Bonneuil, J.-B. Fressoz, *L'Événement anthropocène*, 2013

Rockström & al., *A safe operating space for humanity*, 2009

Steffen & al., *The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration*

48. « Ces soixante dernières années, les êtres humains ont altéré les écosystèmes plus rapidement et plus profondément que dans aucune autre période comparable de l'histoire humaine. Les courbes figurant les tendances historiques de l'activité humaine et les changements physiques qui ont affecté le système terrestre présentent une progression lente depuis 1750 et une croissance exponentielle après 1950. En 2005, les climatologues Will Steffen, Paul Cruzen et l'historien John McNeill ont proposé le terme de « grande accélération » pour désigner ce phénomène, révélateur de bouleversements sociaux et environnementaux. », Cécile Marin, Le Monde Diplomatique. Disponible en ligne (consulté le 22/01/2021)



2.2 — Analyser les récits dominants et alternatifs en vue d'ajuster nos représentations ⁴⁹

Faire preuve d'esprit critique sur soi-même, son travail, ses croyances, sa conscience, son langage, etc. afin de déconstruire les discours dominants (le progrès, la technique et la question de sa neutralité, l'ingénieur, le développement durable, les bienfaits de l'industrie, l'opposition high-tech / low tech, la nature, etc.) et analyser l'influence des technosciences sur nos comportements et imaginaires. Construire de nouveaux récits pour l'ingénieur, c'est se demander collectivement et individuellement « quels ingénieurs voulons-nous devenir et à quelles sociétés voulons-nous contribuer ? ». Tout en gardant une expertise scientifique et technique fine, l'art, les lettres et la fiction peuvent, entre autres, contribuer à libérer nos imaginaires et envisager de nouvelles trajectoires techniques compatibles avec les enjeux. La philosophie permet d'interroger les relations entre humains et nature (domination, exploitation, préservation, vie en symbiose...) et la place des humains sur terre, en différents lieux et époques.

Ressources

Collectif FORTES, *Manuel de la Grande Transition*, Les liens qui Libèrent, 2020. Porte logos (pp 203-249).

The Shift Project, *audition de P. Bihouix et R. Colon*

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ Intégrer une réflexion sur le langage (importance des mots, valeur politique ou morale du langage, etc.), par exemple dans les cours de management et développement personnel.
- ▶ Introduire un cours d'histoire des sciences et des techniques pour mettre en perspective les développements techniques présents au regard des développements techniques passés.
- ▶ Travailler avec les étudiants sur leur positionnement : les pousser à clarifier ces derniers, se décentrer pour envisager d'autres récits, revenir sur des situations vécues par les étudiants et analyser la manière dont leurs valeurs ont influencé leur action.
- ▶ Intégrer activement les étudiants au projet éducatif de l'établissement : fournir un cadre d'échange ouvert entre directions, enseignants et étudiants.
- ▶ Interroger notre rapport à la nature, au vivant, par exemple au travers d'un arpentage de textes ou de livres suivi d'un débat.

Pour aller plus loin

François Jarrige, « *Techno-critiques. Du refus des machines à la contestation des technosciences* », La découverte, 2014

F. Jarrige, A. Vrignon, « *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel* », La Découverte, 2020

Philippe Descola « *Par delà nature et culture* »

Baptiste Morizot, « *Les diplomates* »

49. Cette partie est largement inspirée des travaux du collectif FORTES, publiés dans le *Manuel de la Grande Transition* (Porte « Logos », p. 203)

2.3 — Comprendre les scénarios existants et être capable d'engager une démarche prospective

c'est dessiner les contours d'une vision de l'avenir en s'appuyant sur notre compréhension du présent au regard de notre analyse du passé. Au-delà de tenir compte et de saisir les limites des principaux scénarios et projections, l'ingénieur peut engager une démarche prospective qui respecte les limites physiques (irréversibilité, stocks...) et sociales (effet rebond, verrou technologique...) et respecte les principes démocratiques (se rassembler, échanger, délibérer).

Exemples d'intégration dans la formation

- Réaliser une analyse d'un modèle, World3 par exemple (utilisé dans le rapport au club de Rome), ou encore ceux de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), dans un cours de système complexe, modélisation des systèmes ou autre. Cette simulation prospective permet d'évaluer dans quelle mesure les décisions technologiques prises favorisent un retour à l'équilibre des systèmes vivant et de leurs dépendances (cycles de l'eau, du carbone, etc.), ou aggravent leur détérioration.
- Modéliser grossièrement le système Terre et son fonctionnement et en faire le bilan énergétique – département Génie Énergétique et Environnement de l'INSA Lyon
- Conduire un atelier d'initiation au FSSD, *Framework for Strategic Sustainable Development*. Cette démarche, systémique, stratégique et participative permet d'intégrer la perspective développement durable dans les cœurs de métier, de la vision à l'action. Elle invite à piloter les transformations dans la complexité des transitions socio-écologiques souhaitées avec un backcasting à partir d'un futur souhaité.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615015930>

Ressources

Collectif FORTES, *Manuel de la Grande Transition*, Les liens qui Libèrent, 2020. Porte logos (pp 203-249).
The Shift Project, *audition de P. Bihouix et R. Colon*

Pour aller plus loin

Meadows & al., *Rapport au club de Rome*, 1972

2.4 — Tenir compte des risques et incertitudes dans les scénarios

du point de vue des normes, du point de vue physique et en considérant les effets indirects, non anticipés et/ou non désirés (effets rebond potentiels, changements d'usage, usage non envisagé, etc.). Cela requiert également de tenir systématiquement compte de l'incertitude qui pèse sur le choix des paramètres clés d'un scénario ainsi que sur l'évolution de la valeur de ces paramètres, eux-mêmes relatifs à un système.

Exemples d'intégration dans la formation

Faire un TD sur le Pic de Hubbert et modéliser une production (de pétrole ou d'une autre ressource). Manipuler un modèle mathématique simple qui permet de modéliser une situation physique qui dépend en réalité de nombreux paramètres environnementaux, économiques, techniques et géopolitiques. Après une partie purement scientifique, les étudiants peuvent réfléchir aux incertitudes associées aux prévisions faites avec le modèle. En cours de création au département FIMI à l'INSA Lyon.

Ressources

The Shift Project et AFEP
Rapport, « Analyse du risque « climat » »

Pour aller plus loin

Haut Conseil pour le Climat, « Renforcer l'atténuation, Engager l'adaptation »



OBJECTIF 3

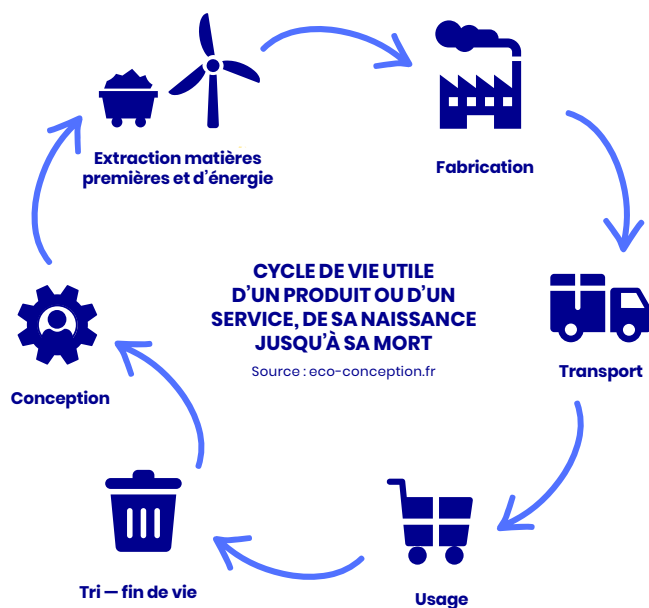
Sciences & techniques de l'ingénieur compatibles avec les objectifs sociétaux et les contraintes physiques



Photo : INSA Toulouse © Baptiste Hamousin

L'ingénieur peut utiliser des techniques contribuant à une société résiliente et tenant compte du contexte socio-historique. Les techniques d'évaluation des impacts sociaux et écologiques permettent de dévoiler les conséquences des choix techniques. Les principes de conception à privilégier visent la réponse à des besoins essentiels, la durabilité, la sobriété énergétique et matérielle, de faibles émissions de GES, la compatibilité avec le vivant (toxicité), l'utilisation de matériaux biosourcés, la recyclabilité et la biodégradabilité, ainsi que l'autonomie.

Cet objectif est largement développé dans la partie « *Quelles trajectoires pour l'ingénierie et les techniques* » (p. 80).



3.1 — Maîtriser les outils d'évaluation multicritères et transformer les outils existants

afin qu'ils intègrent pleinement les enjeux socio-écologiques. On peut citer les modèles dynamiques, les outils de comptabilité carbone, les outils d'analyses de cycle de vie (ACV), etc. Il convient également d'intégrer les impacts sociaux, les critères de durabilité, de réparabilité et d'autres critères de « performance » au sens noble. L'ingénieur peut améliorer et adapter ces outils, et peut notamment les mobiliser dans les processus de conception, production, usage et maintenance des objets et services.

Exemples d'intégration dans la formation

- Dans les projets ou les stages, systématiser l'utilisation de comptabilité carbone dans les processus d'innovation et de conception et en contrepoint systématiser l'analyse de ce qu'une comptabilité monocritère peut induire pour les autres enjeux.
- TD : bien choisir son indicateur d'impact sur la biodiversité en fonction des situations.
- TD : évaluer les impacts environnementaux (notamment GES et biodiversité) et sociaux de divers produits plus ou moins revendiqués « écologiques », « éthiques » ou « responsables ».
- Module « Dérèglement climatique, rôle et outils de l'ingénieur », où sont présentées des applications de quelques outils et méthodes de l'ingénieur appliqués à la prise de décision responsable sur le plan environnemental : SWOT, Analyse fonctionnelle FAST, AMDEC, Ishikawa, Plans d'expériences, Analyse multicritère, ACV, Fabrication additive, Maintenance proactive-Pronostic, INSA Hauts-de-France.

- Évaluation du projet à l'aide de la matrice Cycle de vie, INSA Rouen.
- Comparer les outils d'évaluation multicritères avec les principes du vivant tels qu'énoncés par les biologistes et les acteurs du biomimétisme. Comprendre comment le vivant assure le compromis entre performance fonctionnelle (se nourrir, se déplacer, communiquer, ...) et performance environnementale (frugalité dans la consommation des ressources). Ex. Guide Karim

Ressources

PARTIE « Quelles trajectoires pour l'ingénierie et les techniques? » (p. 80)

Association Bilan Carbone

<https://www.associationbilancarbone.fr/>

ADEME, Base Carbone & Base Impact, ainsi que les ressources relatives à l'analyse cycle de vie (ACV)

« ISO 14040:2006(fr), Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre »

La Fabrique écologique, Vers des technologies sobres et résilientes, 2019

Centre d'études et d'expertises dédié au déploiement du biomimétisme (CEEIOS)

Pour aller plus loin

Programme des Nations Unies pour l'environnement, « Lignes directrices pour l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV) des produits », 2009

Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) et Office français de la biodiversité (OFB), « Indicateurs et outils de mesure : Évaluer l'impact des activités humaines sur la biodiversité ? »

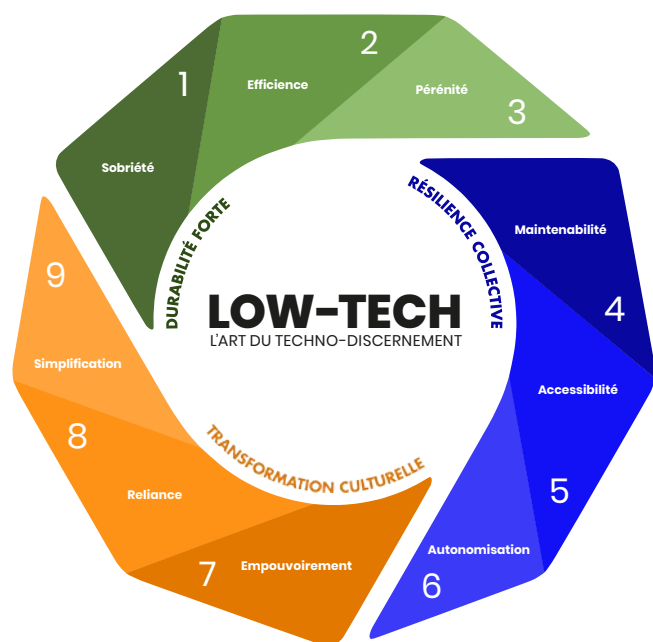
P. Bihouix, L'âge des lowtech, Vers une civilisation techniquement soutenable, 2014

3.2 — Inscrire un produit, un procédé dans une démarche responsable et pouvoir en identifier les limites

De même que les outils de l'ingénieur sont nombreux, les démarches auxquelles les associer ne manquent pas : économie circulaire, analyse systémique, démarche *low tech*, etc. Identifier les atouts, les domaines d'application et les limites de chaque démarche permet de choisir et d'articuler celles qui seront adaptées à chaque situation.

Exemple :

- Évaluer le produit ou l'outil selon une grille de critères en constante évolution, à toutes les étapes de la production et permettant de prendre en compte les limites physiques du système Terre ainsi que les conséquences sur la structure sociale. Voir par exemple la grille de critères relative aux *low tech*. (A. Keller, E. Bournigal)



Adapté du travail d'Arthur Keller & Émilien Bournigal
Version complète, incluant les définitions de ses neuf concepts-clés, **accessible en ligne**.

Exemples d'intégration dans la formation

- Réaliser des projets de conception en suivant les objectifs *low-tech* en collaboration avec le *low-tech lab* et/ou des acteurs du territoire de l'école. Par exemple en partenariat avec Plastic Odyssey, le CEFREPADE ou l'Atelier Paysan à l'INSA Lyon.
- Évaluer avec les étudiants et avec des biologistes la meilleure manière de concevoir un projet de construction non seulement pour éviter des destructions mais aussi contribuer à restaurer les services écosystémiques (ombre, purification des eaux usées...).
- Écoconception de produits énergivores : application à un produit de grande consommation de type petit électroménager. ECOPEM - Empreinte environnemental du petit électroménager (univ-valenciennes.fr)
- L'INSA Toulouse a mis en place un module pluridisciplinaire « Ingénierie et enjeux écologiques » en milieu de cursus, centré autour de l'analyse d'un objet du quotidien, ayant pour objectif de réaliser un cycle de vie, situer le contexte technique, historique, social, économique, philosophique, et les enjeux d'une problématique complexe, faire des analyses quantitative d'énergie ou de ressources consommées, identifier et utiliser des sources fiables, transmettre de manière claire et concise les éléments-clés et les conclusions et mobiliser les ordres de grandeurs, chiffres, dates, concepts, noms, unités, machines, penseurs, modèles et organisations liés aux enjeux écologiques. <https://enseignerleclimat.org/resource/47>

Ressources

PARTIE « Quelles trajectoires pour l'ingénierie et les techniques ? » (p. 80)

CEREMA, « La Boussole de la Résilience »

ADEME, *Economie circulaire*

Philippe Bihoux et Romain Colon,
Audition #7 - Les low-tech, quelle place en école d'ingénieur ?

Pour aller plus loin

Bihoux & al., « Vers des technologies sobres et résilientes - Pourquoi et comment développer l'innovation "low-tech" ? »

E. Bonnet, D. Landivar et A. Monnin, « Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement »



Photo : INSA Toulouse © Baptiste Hamousin

3.3 — Maîtriser, critiquer et faire évoluer les méthodes de management

L'ingénieur, en plus d'avoir un titre qui lui donne une légitimité scientifique, dispose souvent du statut de cadre. Les techniques de management sont donc, la plupart du temps, au cœur de son métier. Or ces dernières ont souvent des origines et objectifs utilitaristes de rentabilité et de performance. Ainsi, l'ingénieur peut avoir un regard critique sur ces techniques en analysant l'organisation du travail en général (sociologie du travail, droit du travail, risques au travail comme l'aliénation au travail, les différents types de contrat de travail, les discriminations de genre, de classe, d'origine, etc.).

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ S'exercer au management et à la gestion de projet, associés au bien-être professionnel, avec une association comme le « Parlement européen des Jeunes ».
- ▶ Après utilisation d'un certain nombre d'outils dédiés à l'amélioration continue (Ishikawa, SWOT, Plan d'expérience), présentation d'une méthode d'identification du style de management du système dans lequel l'amélioration est souhaitée (autocratique, technocratique, anarchique, organique). Suite au positionnement du système dans l'un de ces quatre modes de management, propositions de solutions pour aller davantage vers le mode organique.
- ▶ Cours hybride sur la Responsabilité Sociétale des Organisations (RSO) mêlant enseignements magistraux, recherches personnelles et débats, comme à l'Université Lyon III.
- ▶ Former les étudiants à la posture et aux outils de la gouvernance partagée.

Ressources

Nations Unies

Stratégie du Pacte mondial des Nations Unies

Nations Unies

Académie du pacte mondial des Nations Unies

Pour aller plus loin

United Nations Global Compact

Egalité des genres : comment les entreprises peuvent accélérer le rythme du changement

United Nations Global Compact

Fixer des objectifs basés sur la science pour atteindre le net zéro

S. Mercier, *L'éthique dans les entreprises*

M. Naudin, G. Tibi, *Progrès ou aliénation, que portent les nouvelles dynamiques du travail ?*

D. Graeber, *Bullshit jobs*, 2018



OBJECTIF 4

Action responsable grâce à la raison, aux perceptions sensibles et émotionnelles



Photo : INSA Toulouse © Baptiste Hamousin

Grâce à des réflexions individuelles et collectives, l'appui de pairs et de techniques, l'ingénieur peut agir en cohérence avec ses valeurs et avec les enjeux socio-écologiques. Il est nécessaire de le préparer à répondre individuellement et collectivement aux inévitables dilemmes. L'esprit critique et la réflexivité sont des atouts. Les dimensions sensibles (le corps) et émotionnelles sont des atouts précieux et complémentaires à l'approche cognitive dans le traitement de ces arbitrages et contribuent au bien-être et à l'épanouissement.

4.1 – Identifier les sphères de responsabilité et piloter collectivement les choix technologiques

L'identification des sphères de responsabilité individuelle (personnelle et professionnelle) et collective permet ensuite de chercher des leviers pour faire correspondre son action (individuelle ou collective) à ses principes et aux objectifs sociétaux. La compréhension des grands principes d'éthique permet de soutenir ce questionnement : savoir analyser les situations et en identifier les dilemmes, questionner les valeurs, connaître les positionnements possibles comme l'analyse des conséquences de ses actes ou l'action selon des principes que l'individu juge bons, connaître l'intérêt et les limites des chartes d'éthique ou des codes de déontologie, etc. Par ailleurs, l'introduction, l'arrêt ou le développement d'une technologie concerne une pluralité de parties prenantes que l'ingénieur peut inclure dans la gouvernance. Piloter collectivement les choix technologiques permet d'envisager la trajectoire la plus adaptée et d'en anticiper les conséquences.

Ressources

Société des ingénieurs et des scientifiques de France (IESF), Charte IESF

ADEME, « *Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité* »
lien : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/2289-changer-les-comportements-faire-evoluer-les-pratiques-sociales-vers-plus-de-durabilite-9791029703638.html>

Pour aller plus loin

D. Graeber, *Bullshit jobs*, 2018

L. Flandrin, F. Verrax

« *Quelle éthique pour l'ingénieur ?* », 2019

Exemples d'intégration dans la formation

- Voir infographie plus bas : « Principales étapes d'un processus de traitement de dilemme et formes pédagogiques associables ».
- Éthique intégrée à un module pluridisciplinaire à l'INSA Toulouse, dans une forme pédagogique active centrée sur la réflexion autour d'un objet de la vie quotidienne
<https://enseignerleclimat.org/resource/47>
- Cours sur la Responsabilité Sociétale Individuelle (RSI) à l'INSA Lyon.
- Travailler avec les étudiants sur leur positionnement : les pousser à le formuler, se décentrer pour envisager d'autres récits, revenir sur des situations vécues par les étudiants et analyser la manière dont leurs valeurs ont influencé leur action.

4.2 – S'appuyer sur ses sensations physiques et sur ses émotions et s'inspirer des arts et de la culture

Les émotions sont aussi indicatrices du légitime et de l'illégitime, et les écouter permet d'affiner ou de corriger les intuitions premières, en vue d'agir réellement en accord avec ses valeurs. Les arts et la culture sont des médiateurs permettant de prendre en compte ses émotions. L'expérience humaine du monde se fait au travers de notre corps en premier lieu, comment donc l'écarter de notre quotidien professionnel ? Les humains sont également des êtres d'émotion, bien que se croyant souvent très rationnels. L'accepter permet de mieux se comprendre mais aussi de comprendre les autres, surtout lors d'un travail collectif. Pour favoriser une décision éclairée, la bonne transmission de ses connaissances, aux décideurs et à toute partie prenante, est fondamentale. La mobilisation de la médiation scientifique ou de la « mise en récit » peuvent par exemple inciter à une action pertinente par une bonne assimilation du message.

Exemple :

- Comment imaginer toutes les dérives possibles à partir du développement d'une nouvelle technologie, aussi bien néfastes que comme détournement offrant des solutions impensées par les concepteurs ? La science-fiction a souvent tenté d'extrapoler l'utilisation des technologies. Les armées française et américaine ont désormais recours à ces exercices.

Ressources

Collectif FORTES, « *L'approche tête-corps-cœur* »
Manuel de la Grande Transition,
Les Liens qui Libèrent, 2020

Pour aller plus loin

A. R. Damasio, *L'erreur de Descartes*

Exemples d'intégration dans la formation

- Organiser une fresque des nouveaux récits
fresquesdesnouveauxrecits.org
- Participer à une *marche du temps profond* (Deep time walk)
Une marche de 2,3 km pour parcourir les 4,6 milliards d'années de la Terre, au rythme de 2 millions d'années par mètre. À partir de la formation du système solaire et de la création de la Terre, la Deep Time Walk (initiée par le Schumacher College) invite à découvrir les événements importants de l'histoire de la Terre pour souligner le caractère unique et exceptionnel de la Vie.

PRINCIPALES ÉTAPES D'UN PROCESSUS DE TRAITEMENT DE DILEMME ET FORMES PÉDAGOGIQUES ASSOCIABLES

Source : The Shift Project 2021

Au centre : les étapes pour appréhender une situation avec éthique. Leur ordre n'est pas strict, et nécessite plusieurs itérations. Les étapes doivent être conduites collectivement quand cela est pertinent (ex : intégrer les personnes concernées par les impacts)

Autour : comment un établissement peut s'emparer de ces enjeux pédagogiques

Toute la formation permet de préparer aux différentes étapes et notamment à l'analyse des enjeux sous-jacents à une situation : l'anthropocène, la physique, le changement climatique, l'esprit critique, les enjeux de biodiversité, la gouvernance en entreprise, la vision systémique, l'analyse historique et sociale des enjeux, l'Analyse de Cycle de Vie, etc.





Photo : INSA Lyon © Nicolas Robin

4.3 — S'appuyer sur la pensée critique et faire preuve de réflexivité

pour s'assurer de tenir compte des enjeux socio-écologiques dans toutes ses décisions, l'ingénieur peut revenir sur ses propres actions et positions afin de les interroger. En d'autres termes, il a la capacité d'agir en tant que citoyen dans le monde professionnel. L'adoption d'une posture réflexive implique de développer sa capacité de comprendre et de questionner les valeurs sous-jacentes à nos décisions, et de procéder activement à une actualisation de ses propres connaissances dans ces domaines.

Exemple :

- ▶ Quel mode de transport individuel devrait être le plus valorisé socialement : un SUV luxueux, une voiture électrique, un vélo cargo ? Chacun de ces transports peut véhiculer : l'appartenance à une classe sociale, mais aussi des impacts sociaux, écologiques, le sens des responsabilités et de l'intérêt général, etc.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ Mettre en place un cours dédié ou des cafés-débats sur le rôle souhaité de l'ingénieur durant différents moments de la formation, afin de construire progressivement la vision que chaque étudiant souhaite suivre. Le questionnement peut permettre aux enseignants et à l'établissement de co-construire de manière toujours évolutive leur positionnement. Des alumni pourraient également y participer.

Ressources

Penser critique (site)
Codex des biais cognitifs

Pour aller plus loin

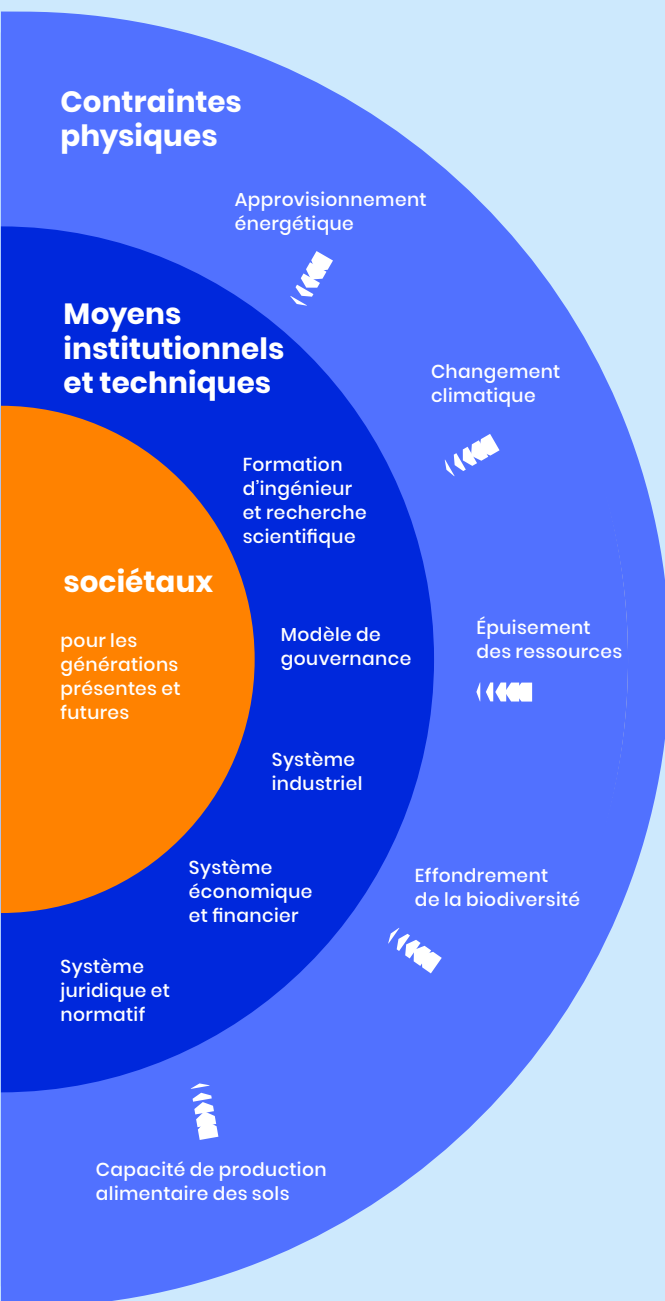
A. Fisher, M. Scriven, *Critical Thinking*

LES DIFFÉRENTS ENJEUX présentés ci-dessous sont considérés comme essentiels à aborder en école d'ingénieur en ce qu'ils couvrent des connaissances et savoirs essentiels des enjeux de la transition socio-écologique. Cela ne présume pas que tous les enjeux socio-écologiques sont d'importance égale dans le cadre des formations d'ingénieur. Néanmoins, il nous semble préférable d'aborder chacun des enjeux socio-écologiques, de manière succincte pour certains et approfondie pour d'autres, plutôt que d'en aborder uniquement quelques-uns de manière très complète. Chacun des enjeux socio-écologiques devrait être analysé à l'aune des compétences précédemment présentées, notamment l'approche systémique. **Le référentiel complet est disponible gratuitement sous forme de tableur sur la page web du projet.** Il mentionne tous les niveaux et sous-niveaux d'enjeux, ainsi que des sources et des exemples. Les différents enjeux y sont structurés selon 5 axes principaux, présentés ci-dessous. Cette classification n'est pas reprise dans la suite du présent document, par souci de concision.

- » **Contextualisation** (historicisation, contexte social et technique, situation actuelle par rapport aux enjeux socio-écologiques, etc.)
Ex. pour le changement climatique : *Qu'est-ce que le climat ? Quel est son histoire ? Où en est-on ? Quels sont les ordres de grandeur en jeu ?*
- » **Mécanismes** (fonctionnement interne, normes, etc.) ;
Ex. pour le changement climatique : *Quels sont les mécanismes physico-chimiques régissant le changement climatique ?*
- » **Relations & interactions** (relations avec les autres enjeux) ;
Ex. pour le changement climatique : *Quelles relations avec les autres enjeux, comme le système industriel ou la biodiversité ? Le climat, un enjeu pivot.*
- » **Risques & limites** (risques actuels par rapport aux enjeux socio-écologiques et limites des réponses apportées) ;
Ex. pour le changement climatique : *Quels risques le changement climatique fait-il courir, quelles sont les trajectoires envisagées par le GIEC ?*
- » **Perspectives** (quelles projections, quelles solutions, prospective).
Ex. pour le changement climatique : *Comment réduire les gaz à effet de serre ? Comment s'adapter aux conséquences de mécanismes déjà en œuvre ?*

Une enquête réalisée avec l'association Alumni for the planet (et disponible sur la page du projet) auprès de plus de 1000 ingénieurs en poste montre que 60 % considèrent que les connaissances présentées ici seraient utiles dans le cadre de leur métier aujourd'hui, et encore davantage d'ici 10 ans.

Pourtant, s'ils sont 82 % à considérer avoir un bon niveau de connaissances sur les causes et conséquences du changement climatique, et 67 % concernant les usages de l'énergie, seuls 50 % considèrent qu'ils comprennent les enjeux liés aux ressources hors énergie, et 40 % ceux liés à la biodiversité et les enjeux liés au système alimentaire.



Connaissances incontournables pour l'ingénieur du XXI^e siècle

Introduction à l'anthropocène

Biodiversité, changement climatique, ressources limitées, enjeux sociétaux... Le défi de l'humanité se révèle particulièrement complexe en ce XXI^e siècle, notamment à cause de sa dimension globale et de la multitude, les interdépendances et l'évolutivité des situations. La notion d'Anthropocène permet de comprendre l'ampleur des impacts des activités humaines, comme le montre la « Grande Accélération » ou les limites planétaires, et de disposer d'une vue d'ensemble, avant de plonger dans des points de vue plus disciplinaires.

Pistes de contenu

- ▶ Se référer à la partie « prendre acte de notre héritage » dans laquelle le contenu essentiel à cette partie y est développé ;
- ▶ Penser avec les principaux ordres de grandeurs relatifs aux enjeux climat-énergie

Recommandation : 25 heures d'enseignements dédiés en début de cursus, de préférence en privilégiant les pédagogies actives⁵⁰, puis rechercher quel est le « front anthropocénique » dans la plupart des enseignements traditionnels d'écoles d'ingénieur.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ En tronc commun, 4 heures de CM⁵¹ pour contextualiser mais sans « assommer » les étudiants⁵² avec les nombreuses notions, puis 20 heures d'apprentissage sous formats actifs : arpentages, débats, TD de modélisation et ordres de grandeur, travail de groupe sur des scénarios crédibles et sur des trajectoires souhaitables...
- ▶ Module « *Introduction à l'Anthropocène* » depuis la rentrée 2021 à l'INSA Lyon : 2 heures de CM sur les limites du système Terre et les représentations et récits de l'Anthropocène, 2 heures de TD introduisant quelques bases mathématiques et physicochimiques pour appréhender quelques enjeux de l'Anthropocène, 1 heure de débat par groupe, 5 heures d'arpentage sur la conférence de présentation du rapport spécial du GIEC de 2018.

Ressources

J. Treiner, *Fil conducteur pour une introduction à l'Anthropocène en début d'études supérieures*, 2020

W. Steffen & al. *The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration*. 2015

F. Gemenne, A. Rankovic, « *Atlas de l'Anthropocène* », 2021

Pour aller plus loin

C. Bonneuil, J-B. Fressoz, *L'événement anthropocène*, 2013

R. Beau, C. Larrère, *Penser l'anthropocène*, 2018

Steffen, W. & al. *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*. 2015

50. Pour plus d'informations concernant les approches pédagogiques, voir le chapitre « Former les ingénieurs du XXI^e siècle »

51. Cours Magistral

52. Proposition suite aux échanges avec différents étudiants

Approvisionnement énergétique

Pilier de la plupart des sociétés, l'énergie alimente les machines et leur permet de nous rendre de nous loger, nous chauffer, manger, nous soigner, nous déplacer, communiquer... à la mode occidentale, c'est-à-dire en impliquant souvent beaucoup d'énergie et de transformations, y compris de notre environnement. La crise socio-écologique est très liée à l'énergie, il faut comprendre ce lien en profondeur, notamment sous le prisme du changement climatique et de l'omniprésence des énergies fossiles. La réduction de la dépendance de nos activités aux flux d'énergie (et de matières) devient une nécessité stratégique, financière, écologique et sociale.

Approvisionnement énergétique

Pilier de la plupart des sociétés, l'énergie alimente les machines et leur permet de nous rendre ces innombrables services : se loger, se chauffer, manger, se soigner, se déplacer, communiquer... à la mode occidentale c'est-à-dire la plupart du temps impliquant une grande quantité d'énergie et donc de grandes transformations, y compris de notre environnement. Son utilisation ne fait qu'augmenter et se corrèle avec le PIB. La crise socio-écologique est extrêmement liée à l'énergie, il faut comprendre ce lien en profondeur, notamment sous le prisme du changement climatique et de l'omniprésence des énergies fossiles. Cette double contrainte énergie-climat vient remettre en question les fondements même de nos sociétés industrielles car elle implique la décorrélation entre le sentiment de prospérité et le niveau des flux physiques. La réduction de la dépendance de nos activités aux flux de matières et d'énergie devient une nécessité stratégique, financière, écologique et sociale⁵³.

Pistes de contenu

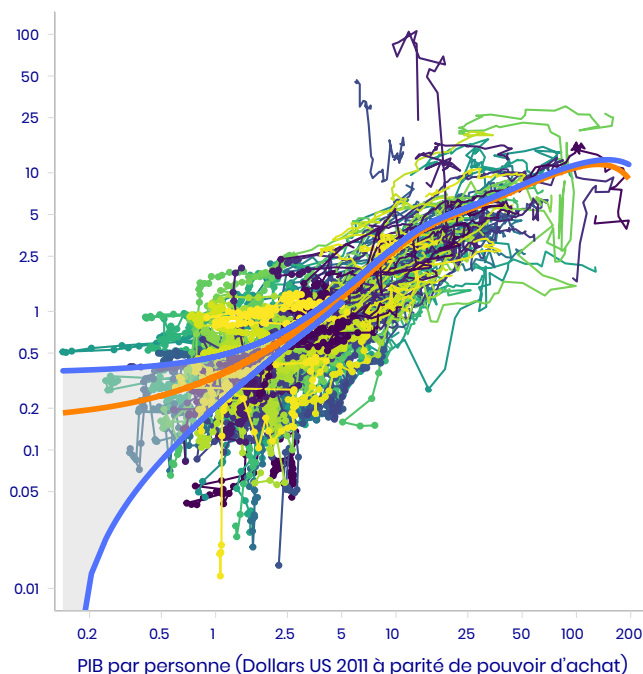
- Définition de l'énergie (définition, stock, vecteur, flux, lois physiques...), connaître ses différentes formes et dénominations (renouvelables, fossiles conventionnelles et non conventionnelles, alternatives, intermittentes...)
- Répartition des stocks, des réserves et des productions d'énergie
- Répartition de consommation (selon les pays et les secteurs) et l'usage de cette énergie (mix énergétique, processus de transformation de l'énergie...)
- Enjeux de l'approvisionnement énergétique via différentes approches : politique énergétique (taxes, normes), géopolitique (provenance des produits pétroliers et risques associés, prospective des pays qui vont se développer le plus fortement dans les prochaines décennies, etc.), économique (corrélation PIB-GES, équation de Kaya), etc.

RELATION ENTRE PIB ET ÉNERGIE PRIMAIRE PAR PERSONNE

Relation historique entre PIB annuel par personne en Dollars US 2011 à parité de pouvoir d'achat et l'énergie primaire directe équivalente par personne, incluant les sources non-commerciales par personne en kilowattheures pour 185 pays sur la période 1950-2014, en échelle logarithmique. Chaque couleur représente une série temporelle pour un pays. La ligne orange est une régression loess, et la ligne bleue représente l'écart type 1.96.

Source : Semieniuk, Gregor et al., « Plausible energy demand patterns in a growing global economy with climate policy », *Nature Climate Change*, vol. 11, no. 4, avril 2021, pp. 313-318.

Energie primaire par personne (kWh)



53. <https://theshiftproject.org/ambition>

- ▶ L'analyse des risques liés à l'énergie (double contrainte carbone, limites de stock et analyse des flux, différents systèmes de valeurs, etc.)
- ▶ Différents scénarios énergétiques tenant compte des risques et limites de chacune des énergies ou vecteurs d'énergie, sans oublier le besoin de se tourner vers la sobriété énergétique
- ▶ Parallèles et transpositions des enjeux de la gestion de l'énergie entre sociétés humaines (technologiques) et systèmes biologiques naturels (stocks, vecteurs, flux, consommation, usages, etc.)

Recommandation : 20 heures d'enseignements dédiés principalement en début de cursus. En cours non dédiés, une grande partie peut être intégrée en cours de physique (définition, principes physiques) ou en spécialité (les enjeux de l'énergie dans ma spécialité, les pistes de réponses).

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ Définitions et grands principes physiques en cours de physique
- ▶ 14 heures d'enseignements dédiés sur les types d'énergies, les ordres de grandeur, la répartition des stocks et la consommation, les politiques et normes énergétiques en France et en Europe, le lien avec le climat, le PIB, les inégalités, le système industriel extractiviste et les enjeux géopolitiques
- ▶ 6 heures d'arpentage ou de TD suivis de débat sur des scénarios énergétiques plausibles et souhaitables
- ▶ Intégration plus ou moins poussée dans les projets, peut aller jusqu'à être l'un des objectifs centraux. Ex: concevoir un objet au bilan énergétique très faible sur tout son cycle de vie
- ▶ Intégration à titre d'illustration, de contextualisation ou d'exercice dans les cours de physique, énergie, modélisation, électricité, analyse de risques, langues, autres enseignements d'humanités, etc.

Ressources

DataLab (MTE), Chiffres clés de l'énergie 2021

J-B. Fressoz, Pour une histoire désorientée de l'énergie, 2014

A. Vrignon, F. Jarrige, Face à la puissance: Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel, 2020

Pour aller plus loin

ADEME, Transition(s) 2050

RTE, Futurs énergétiques 2050

négaWatt, scénario 2022

AIE, Energy transitions tracking process

Sauvons le climat, négaTep 2017

UFE, scénarios prospectifs

ANCRE, prospective énergétique

T. Mitchell, Carbon Democracy, 2011

Changement climatique

Les objets, les processus et les services conçus par les ingénieurs impactent souvent le climat. Le climat est lié à tous les enjeux de l'Anthropocène. Pour les ingénieurs, la dimension physico-chimique importe afin de leur permettre d'intégrer scientifiquement ces enjeux dans leurs pratiques, sans pour autant viser à en faire des climatologues. Le sujet est vaste pour les ingénieurs car il s'agit d'appréhender les causes, mais aussi les conséquences physiques et sociales ainsi que les implications des différents scénarios et choix techniques.



Photo : Unsplash / Keren Fedida

Pistes de contenu

- ▶ Définition de « climat » (différence entre météorologie et climatologie)
- ▶ Evolution historique du climat depuis la dernière ère glaciaire
- ▶ Les acteurs – structures ou individus – qui travaillent (climatologues, GIEC...) sur la question climatique
- ▶ Le fonctionnement physique du climat (causes, chaînes de causalité, boucles de rétroaction, seuils et conséquences)
- ▶ Diagnostic scientifique des causes et des conséquences du changement climatique, lien entre climat et autres sphères (limites planétaires et sociétale)
- ▶ Comptabilité des GES
- ▶ Les scénarios du GIEC
- ▶ Equation de Kaya
- ▶ Enjeux politiques liés au climat (conférences des parties (COP) par exemple)
- ▶ Enjeux sociaux liés au climat (justice climatique)
- ▶ Principales réponses des sociétés et leur analyse critique (négociations internationales sur le climat, droit de l'environnement, réglementation, fiscalité, sobriété notamment énergétique, géoingénierie, capture et stockage du carbone (CSC), arrêt de certaines technologies, remplacement de certaines sources d'énergie, etc.).
- ▶ Les pistes proposées par The Shift Project pour décarboner l'économie dans tous les secteurs clés, dans son Plan de Transformation de l'Economie Française

Recommandation : 20 heures d'enseignements dédiés principalement en début de cursus, de préférence en privilégiant les pédagogies actives⁵⁴. En cours non dédiés, une grande partie peut être intégrée en cours de physique (principes physico-chimiques) et en cours de SHS en début de cursus, puis en spécialité (les enjeux du changement climatique dans ma spécialité, les pistes de réponses comme les bilans d'émissions de GES, la conception bas carbone, les matériaux bas carbone, etc.) et à titre de contextualisation ou illustration dans les autres enseignements.

Ressources

GIEC, *Résumé à l'intention des décideurs*

Carbone 4, *Rapport du GIEC : rappel des points clés*

University of California, *Bending the Curve: Climate Change Solutions*, chap. 3-4, 2019. Disponible en ligne.

Jean-Louis Dufresne, audition pour le Shift Project

Pour aller plus loin

MTES & I4CE, *Chiffres clés du climat : France Europe et Monde*, Edition 2020

The Shift Project, *9 propositions pour que l'Europe change d'ère*, 2017

MTE, *Stratégie Nationale Bas-Carbone*

ADEME, *L'atténuation et l'adaptation*, 2018

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ 3 heures de Fresque du Climat en tout début de cursus. Des enseignants peuvent se mêler aux étudiants pour s'informer et échanger avec les étudiants sur l'atelier et les émotions provoquées. Les animateurs peuvent être des vacataires, des enseignants ou des étudiants préalablement formés.
- ▶ Grands principes physico-chimiques en cours de physique
- ▶ En tronc commun, 4 heures de CM pour contextualiser mais sans « assommer » les étudiants⁵⁵ avec les nombreuses notions, puis 10 heures d'apprentissage sous formats actifs : diagnostic scientifique, le lien avec la biodiversité, la comptabilité des GES et le lien avec l'industrie et les services, les enjeux sociaux et les principales réponses des sociétés, etc.
- ▶ 6 heures d'arpentage ou de TD suivis de débat sur des scénarios climatiques plausibles et souhaitables, et les liens avec l'ingénierie. Ex : Arpentage et débat sur le Plan de Transformation de l'Economie Française du Shift Project
- ▶ Intégration plus ou moins poussée dans les projets, peut aller jusqu'à être l'un des objectifs centraux. Ex : concevoir un objet bas carbone

54. Pour plus d'informations concernant les approches pédagogiques, voir le chapitre « Former les ingénieurs du XXI^e siècle »

55. Proposition suite aux échanges avec différents étudiants

Épuisement des ressources*

Le développement des sociétés est étroitement lié à la disponibilité, l'extraction, la transformation, l'utilisation et la fin de vie de ressources minérales et organiques. Elles permettent alimentation, puissance physique, santé, culture, confort, etc. et sont intrinsèquement liées aux trajectoires sociotechniques. Piliers de la majorité des secteurs d'activité, tout comme les ressources énergétiques, elles créent des dépendances et des risques pour ces secteurs : épuisement des ressources, possibles fluctuations de leur prix et de leur qualité, etc.

Pistes de contenu

- ▶ Usage et rôle des matériaux de structure (acier, alliages, ciment...) et des matériaux non métalliques (sable, bois, produits pétroliers...)
- ▶ Procédés d'extraction et de recyclage, limites et difficultés, données économiques
- ▶ Lien et interdépendance entre production d'énergie et ressources minérales
- ▶ Matériaux dont la disponibilité est sous contrainte forte ou le sera à court/moyen terme
- ▶ Pistes de réduction de l'utilisation des matériaux : écoconception, impression 3D, biomimétisme, matériaux renouvelables, etc.
- ▶ Focus sur les matériaux bio-inspirés (matières premières, structuration de la matière, multifonctionnalité, procédés de manufacture) pour favoriser l'allègement de structures, l'utilisation de ressources locales, abondantes, et renouvelables

Recommandation : 20h d'enseignements dédiés principalement en début de spécialité. En cours non dédiés, une grande partie peut être intégrée en cours de matériaux, chimie, conception, gestion des risques, procédés industriels et autres sciences de l'ingénieur ainsi qu'en cours de SHS et à titre de contextualisation ou illustration dans les autres enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ En tronc commun, 10 heures de CM.
- ▶ Intégration dans les cours de matériaux, résistance des matériaux, conception, etc. en spécialité. Ex : la construction bois et l'utilisation de matériaux recyclés en génie civil, la fabrication additive métallique en génie mécanique, la chimie verte, etc.

- ▶ 10 heures de TD/TP en spécialités

- ▶ Intégration à titre d'illustration, de contextualisation ou d'exercice, possible et souhaitable dans la plupart des enseignements

Ressources

Olivier Vidal *audition pour le Shift Project*

Olivier Vidal, *Matières premières et énergie, les enjeux de demain*, 2019

Rapport sur l'état de l'environnement, *Gestion et utilisation des ressources : un enjeu majeur*, 2021

MTE, *Transition énergétique et ressources minérales : Les défis à relever*, 2018

Pour aller plus loin

C. Cazanave & F. Barjhoux, « *Attention, ressources naturelles sous haute tension !* »

Benoît de Guillebon et Philippe Bihouix, « *Quel futur pour les métaux ?* »

MTE, *Matériaux de construction biosourcés et géosourcés*

ADEME, *L'épuisement des métaux et minéraux, faut-il s'en inquiéter ?*, 2017

* hors ressources énergétiques

Effondrement de la biodiversité

Un enjeu pivot. Comprendre les causes de l'effondrement actuel : artificialisation massive des sols, usage généralisé de produits phytosanitaires, changement climatique, etc. La bonne compréhension de l'intrication entre biodiversité et société (relation entre la santé environnementale et la santé humaine, services écosystémiques, etc.) ainsi que la connaissance des différentes représentations qu'ont les humains de la nature sont nécessaires pour engager systématiquement des actions pertinentes de conservation et de restauration.

Pistes de contenu

- Définition et niveau de connaissance actuel sur la biodiversité
- Concept d'écosystème
- Conséquence des activités humaines, notamment de l'artificialisation des sols, des pollutions chimiques et du changement climatique, ainsi que les axes de dégradation « HIPPO »
- Concept de santé globale (« one health ») et compréhension de l'interdépendance des santés humaine et environnementale
- Principaux indicateurs de l'état de la biodiversité
- Outils de protection, restauration, réhabilitation et favorisation de la biodiversité et leurs limites
- Définition, usage, potentiel et limite des services écosystémiques
- Grandes représentations et relations à la « nature » dans nos sociétés

Recommandation : 20 heures d'enseignements dédiés plutôt en début de cursus. En cours non dédiés, une partie peut être intégrée en cours de mathématiques, systémique, matériaux, conception, gestion des risques, manufacturing et autres sciences de l'ingénieur ainsi qu'en cours de SHS et à titre de contextualisation ou illustration dans les autres enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- 3 heures de Fresque de la biodiversité en début de cursus.
- En tronc commun, 10 heures d'un mélange de CM et de formats plus actifs
- Intégration dans les cours par exemple en cours de philosophie, droit, RSO, matériaux, conception, gestion des risques, autres sciences de l'ingénieur
- 10 heures de TD/TP en spécialités

- Intégration plus ou moins poussée dans les projets, peut aller jusqu'à être l'un des objectifs centraux. Ex : évaluer l'impact de la production, utilisation et fin de vie d'un objet sur la biodiversité
- Intégration à titre d'illustration, de contextualisation ou d'exercice, possible et souhaitable dans la plupart des enseignements

Ressources

IPBES, travaux comme le *Résumé à l'intention des décideurs du rapport de l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques*

Félix Lallemand, docteur en écologie et évolution audition pour le Shift Project

MTE, *La biodiversité s'explique*

Pour aller plus loin

MTES, *Biodiversité – Les chiffres clés*

Cerema, *Biodiversité, solutions fondées sur la nature et adaptation : des outils et méthodes du Cerema pour les territoires*, 2020. Disponible en ligne.

Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB)

Office français de la biodiversité (OFB)

Capacité de production alimentaire des sols

Afin de préserver la bonne capacité à nourrir les populations, l'ingénieur devrait disposer de notions sur les terres arables, la production agricole, la transformation des matières premières, la distribution et la consommation (qualité, accessibilité, etc.). Les ingénieurs agronomes ne sont pas seuls concernés car le système alimentaire est très technicisé. De fait, les ingénieurs pourront agir directement ou indirectement sur certaines inégalités telles que la précarité alimentaire, ou encore sur les déchets, la consommation d'énergie ou la pollution.

Pistes de contenu

- Définition d'un système alimentaire
- Notions de bases d'agronomie
- Relation entre les systèmes alimentaires (production, transformation, transport, consommation) et l'industrie : recours à la chimie, aux machines, aux transports motorisés, aux emballages, etc.
- Enjeux sociaux (précarité alimentaire...) et territoriaux (résilience)

Recommandation : 10 heures d'enseignements dédiés plutôt en début de cursus. En cours non dédiés, une partie peut être intégrée par exemple en cours de philosophie, économie, gestion des risques, conception et à titre de contextualisation ou illustration dans les autres enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- En tronc commun, 10h d'un mélange de CM et de formats plus actifs
- Intégration dans les cours par exemple en cours de philosophie, économie, conception, gestion des risques, autres sciences de l'ingénieur
- Intégration plus ou moins poussée dans les projets, peut aller jusqu'à être l'un des objectifs centraux. Ex : concevoir et fabriquer un composteur urbain ou industriel
- Intégration à titre d'illustration, de contextualisation ou d'exercice, possible et souhaitable dans d'autres enseignements

Ressources

UVED, *L'enjeu des enjeux : les capacités de production alimentaire*, D. Bourg, 2014

Les Greniers d'Abondance, *Qu'est-ce qu'un système alimentaire*

Les Greniers d'Abondance, *Scénarios*

WFP, *Tout ce que vous devez savoir sur les systèmes alimentaires*, 2021

Pour aller plus loin

L'atelier paysan, *Reprendre la terre aux machines*, 2021

FAO, *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*, 2021

IDDRI, *Vers une transition juste des systèmes alimentaires*, 2021

Formation d'ingénieur & recherche scientifique

Questionner le rôle de l'ingénieur peut constituer un levier important pour le faire contribuer au mieux à une évolution de nos sociétés vers des modèles plus durables. Au travers de l'analyse de l'histoire de l'ingénierie et des ingénieurs, du lien avec la recherche, les entreprises, les territoires et l'économie en général, cela peut ainsi permettre aux étudiants de se forger une vision de ce que serait leur rôle dans la société, mais aussi de contribuer avec les équipes pédagogiques à l'évolution des enseignements dans leur établissement.

Pistes de contenu

- ▶ Histoire des ingénieurs et des techniques
- ▶ Épistémologie
- ▶ Liens avec la recherche, les territoires, les entreprises...
- ▶ Questionner le rôle de l'ingénieur au travers de son histoire et son présent
- ▶ Questionner la formation des ingénieurs au regard des enjeux socio-écologiques

Recommandation : 20 heures d'enseignements dédiés à différents moments du cursus, en pédagogies actives principalement. En cours non dédiés, ce questionnement peut constituer un fil rouge majeur et être intégré dans une majorité d'enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ Exemple de programme :
 - 10 heures d'enseignements dédiés en début de cursus, 10 heures en spécialité
 - Intégration comme fil rouge dans une majorité d'enseignements : par exemple en fin de module, débattre en classe de lien entre les enseignements du module et l'ingénieur en devenir qui est en chacun des étudiants.
 - Intégration comme questionnement personnel de l'étudiant dans les rapports de projets ou de stages
 - Des cafés-débats réguliers tout au long de la formation, avec d'autres étudiants mais aussi avec des alumni, des professionnels, des philosophes et des enseignants.
- ▶ L'ISAE SUPAERO a mis en place un cours électif en première année : « *quel rôle pour l'ingénieur* », qui s'articule avec d'autres activités : cours dédiés aux enjeux environnementaux, fresque du climat, activité low tech ayant pour objectif de « *réorienter l'imaginaire, réinventer le métier d'ingénieur avec de nouvelles contraintes et de nouveaux objectifs* »

Ressources

F. Verrax, L. Flandrin, *Quelle éthique pour l'ingénieur ?*, 2018

A. Bouzin, *Ce que le « militantisme vert » fait aux ingénieurs*, et *L'engagement écologiste des ingénieurs français*, 2021

M. Dubois, N. Brault, *Manuel d'épistémologie pour l'ingénieur.e*, 2021

Pour aller plus loin

Catherine Roby, *Humanités et SHS dans les écoles d'ingénieurs en France : une approche sociohistorique*

S. Paye et A. Derouet, *Quand les ingénieurs débattent de leur formation non technique*

Christelle Didier, *Penser l'éthique des ingénieurs*, 2018

Modèle de gouvernance

Futurs cadres pour la plupart, les ingénieurs peuvent influencer nombre de décisions. La connaissance de différents modèles de gouvernance, y compris aux niveaux intermédiaires dans les organisations, est fondamentale. Comprendre les limites de la représentativité (politique, scientifique, citoyenne) et connaître des modèles alternatifs de gouvernance. Pouvoir intégrer de nouveaux critères de responsabilité sociétale et environnementale dans les outils et instances décisionnels. Disposer d'outils intellectuels pour résoudre un dilemme (voir aussi compétence 4.)

Pistes de contenu

- ▶ Intérêts et dérives de la RSO, de l'ISO 26000, des entreprises B-Corp ou à mission, de la comptabilité extra-financière
- ▶ Outils d'aide à la décision intégrant les critères socio-écologiques
- ▶ Traditions des éthiques mobilisables dans le traitement d'un dilemme (éthique des vertus, éthique déontologique, conséquentialiste...)

Recommandation : 20h d'enseignements dédiés plutôt en milieu et fin de cursus. En cours non dédiés, une partie peut être intégrée par exemple en cours de RSO, de gestion de projet, de management, de communication et à titre de contextualisation ou illustration dans certains autres enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ En tronc commun, 20h d'un mélange de CM et de formats plus actifs
- ▶ Intégration dans les projets qui peuvent être vus comme un laboratoire d'expérimentation de nouvelles gouvernances, de communication, de processus décisionnels, etc.
- ▶ Intégration à titre d'illustration, de contextualisation ou d'exercice, possible et souhaitable dans d'autres enseignements

Ressources

D. Pestre, *Des sciences, des techniques et de l'ordre démocratique et participatif*, 2011

D. Bourg, K. Whiteside, *Pour une démocratie écologique*, 2009

J-P. Gaudillère, C. Bonneuil, *À propos de « démocratie technique »*, 2001

Pour aller plus loin

Laure Flandrin, Fanny Verrax, *Quelle éthique pour l'ingénieur ?*, 2019

SPW, *Comparaison d'outils d'évaluation, d'analyse et de questionnement du développement durable*, 2017

Système industriel

L'industrie est aujourd'hui centrale dans la plupart des modèles de société et l'ingénieur en est l'un des principaux acteurs. Comprendre son histoire, au moins depuis la révolution industrielle, c'est comprendre son évolution sociotechnique, ses conséquences passées, et c'est pouvoir anticiper les conséquences à venir afin de construire un système industriel pérenne, qui réponde avant tout aux besoins de la société (notamment des générations futures) et non à des intérêts privés.

Pistes de contenu

- ▶ Histoire de l'industrie et conséquence sur le présent
- ▶ Organisation du système industriel mondialisé : taylorisation, ultra-spécialisation, usine 4.0, relations fournisseurs/assembleurs, etc.
- ▶ Qu'appelle-t-on le système thermo-industriel extractiviste ?
- ▶ Relation entre capitalisme et industrie
- ▶ Les grands enjeux socio-écologiques d'industries majeures : production d'énergie, électronique et numérique, bâtiment, transport, plasturgie

Recommandation : 10 heures d'enseignements dédiés plutôt en milieu de cursus. En cours non dédiés, une partie peut être intégrée par exemple aux cours de RSO, de management, de procédés industriels, de conception, et à titre de contextualisation ou illustration dans certains autres enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ Exemple de programme :
 - En tronc commun, 10 heures d'un mélange de CM et de formats plus actifs
 - Intégration à titre d'illustration, de contextualisation ou d'exercice, possible et souhaitable dans d'autres enseignements
- ▶ Quelques initiatives à l'INSA Lyon :
 - Projet PASTECH (Paradigme, Société, Technologie Comprendre la trajectoire d'une technologie avec ses apparitions & disparitions en premier cycle).
 - Cours d'« écoconception des machines sûres » abordant le cadre juridique du concepteur de machines

Ressources

- L. Winner, *Do Artifacts Have Politics?* 1980
- ADEME, *Décarbonation : les solutions à l'œuvre*, 2021
- The Shift Project, *Plan de transformation de l'économie française*, 2022
- La Fabrique écologique, *Vers des technologies sobres et résilientes*, 2019

Pour aller plus loin

- F. Jarrige, *Techno-critiques*, 2014
- L. Mumford, *Le mythe de la machine*, 1966
- I. Illich, *Energie et équité ; et La convivialité*, 1973
- J. Ellul, *La Technique ou l'Enjeu du siècle*, 1954
- T. Le Roux (dir.), *Risques industriels*. 2016

Systeme économique & financier

Le travail de l'ingénieur s'inscrit dans un contexte économique et financier. Il devrait certainement en comprendre le fonctionnement et les limites (conséquences sociales et environnementales d'une économie décorrélée du monde physique). L'étude d'alternatives, telles que la décroissance matérielle et l'amélioration de la qualité de vie comme indicateurs, lui permet de contribuer à provoquer un basculement vers un modèle économique soutenable pour toutes et tous en fonction de leur contexte, générations présentes et futures.

Pistes de contenu

- ▶ Paradigmes économiques principaux et alternatifs : fondements, avantages, limites
- ▶ Relation entre économie et monde réel : matériaux, infrastructures, et notamment le lien entre PIB et énergie
- ▶ Durabilité faible, durabilité forte, limites du « développement durable »
- ▶ Intérêts et limites de la finance verte, de l'économie de fonctionnalité, etc.

Recommandation : 10 heures d'enseignements dédiés plutôt en milieu de cursus. En cours non dédiés, une partie peut être intégrée par exemple en cours de RSO, de management, dans des modules sur l'anthropocène ou le changement climatique, et à titre de contextualisation ou illustration dans certains autres enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ En tronc commun, 10 heures de CM et de TD
- ▶ Intégration dans les cours par exemple en cours d'économie, de management, de RSO, etc.
- ▶ Intégration à titre d'illustration, de contextualisation ou d'exercice, possible et souhaitable dans d'autres enseignements

Ressources

ADEME, *Economie de la fonctionnalité*

V. Boisvert, L. Carnoye et R. Petitimbart, *La durabilité forte*, 2019

IRIS, *Qu'est-ce que la tragédie des biens communs*, 2013

The Shift Project, *Étude du lien entre PIB et consommation d'énergie*

Pour aller plus loin

C. Renouard, *Ethique et entreprise*, 2013

C. Renouard et G. Giraud, *Vingt propositions pour réformer le capitalisme*, 2009

C. Bonneau, *Histoire des théories et paradigmes économiques depuis 1945*, 2018

Système juridique & normatif

L'ingénieur manipule des normes et doit respecter des lois. Afin d'éviter des pratiques nuisibles pour les humains ou pour l'environnement, il doit donc connaître les manières dont les normes ou lois peuvent être contournées volontairement ou non, notamment via l'approvisionnement de produits d'autres pays moins regardant, ou par l'interprétation minimaliste des textes. Il peut s'emparer des grands principes des lois et normes visant à favoriser la transition socio-écologique.

Pistes de contenu

- ▶ Principales normes et lois concernant l'ingénieur : Code de l'environnement, ISO9001, 14001, lois anticorruption, droit de l'environnement industriel, etc.
- ▶ Principales dispositions des lois, politique et normes liées à la transition socio-écologique : Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), Loi d'orientation des mobilités (LOM), ISO 26000, Zéro Artificialisation Nette (ZAN)
- ▶ Les grands principes du droit de l'environnement (précaution, prévention, pollueur-payeur, participation, solidarité écologique, etc.)
- ▶ Intérêts et limites : protection parfois, droit à polluer d'autre fois, normes parfois sans besoin de certification, etc.

Recommandation : 10 heures d'enseignements dédiés plutôt en milieu de cursus. En cours non dédiés, une partie peut être intégrée par exemple en cours de RSO, de management, dans des modules sur le changement climatique ou la biodiversité.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ En tronc commun, 10 heures de CM et de TD
- ▶ Intégration dans les cours par exemple en cours de management, de RSO, etc.

Ressources

UVSQ, *Qu'est-ce que le droit de l'environnement ?*

T. Le Roux, *L'émergence du risque industriel (France, Grande-Bretagne, XVIII^e – XIX^e siècle)*, 2014

Annales des Mines,
Responsabilité et environnement

Pour aller plus loin

D. Roman, *La cause des droits*, 2022

Code de l'Environnement

MTE, *La loi d'orientation des mobilités*

MTE, *Loi de transition énergétique pour la croissance verte*

Objectifs sociétaux

En vue de faire un lien explicite entre son métier et ses impacts sur les sociétés, l'ingénieur peut connaître et comprendre les sous-jacents des grands objectifs sociétaux que sont paix et justice, santé, éducation, et réduction des inégalités, pour les générations présentes et futures. Il s'agit également de faire le lien avec les activités humaines permises par le système technique.

Pistes de contenu

- ▶ Grands objectifs sociétaux et leur signification
- ▶ Les Objectifs de Développement Durable, signification, intérêt et critique
- ▶ Principaux mécanismes les favorisant ou défavorisant (Par exemple état de droit et stabilité des institutions pour la paix / déterminants de santé comme le climat, l'exposition à des agents physico-chimiques, le stress, la pollution, etc. / démocratie, développement économique et infrastructure pour l'éducation / politique volontaristes, plafond de verre pour les femmes en entreprise, indicateurs et représentation sociales pour les inégalités, etc.)
- ▶ Liens entre les objectifs sociétaux et l'ingénierie : changement climatique, mondialisation, lien entre santé humaine et santé environnementale, pollutions, transferts de virus et bactéries entre milieux, industrie pharmaceutique, inégalités d'accès, infrastructures et bâtiments telles que routes, écoles, hôpitaux, gares, administrations, réseaux, crises énergétiques, utilisation des ressources, modes de gouvernance, etc.

Recommandation : 10 heures d'enseignements dédiés plutôt en début ou milieu de cursus. En cours non dédiés, une partie peut être intégrée dans de nombreux enseignements.

Exemples d'intégration dans la formation

- ▶ En tronc commun, 10 heures de CM et de TD
- ▶ Intégration dans les cours par exemple en cours de management, de RSO, de conception, etc.
- ▶ Café-débat ou conférence suivie d'un débat sur le lien entre objectif sociétaux et ingénierie dans tel ou tel domaine.
- ▶ Evaluation des objectifs sociétaux en jeu dans les rapports de stage

Ressources

Agenda 2030, Les 17 Objectifs de développement durable (ODD)

SciencePo, Espace mondial : l'Atlas

Le Monde Diplomatique, Vulnérabilité au changement climatique et niveau de préparation

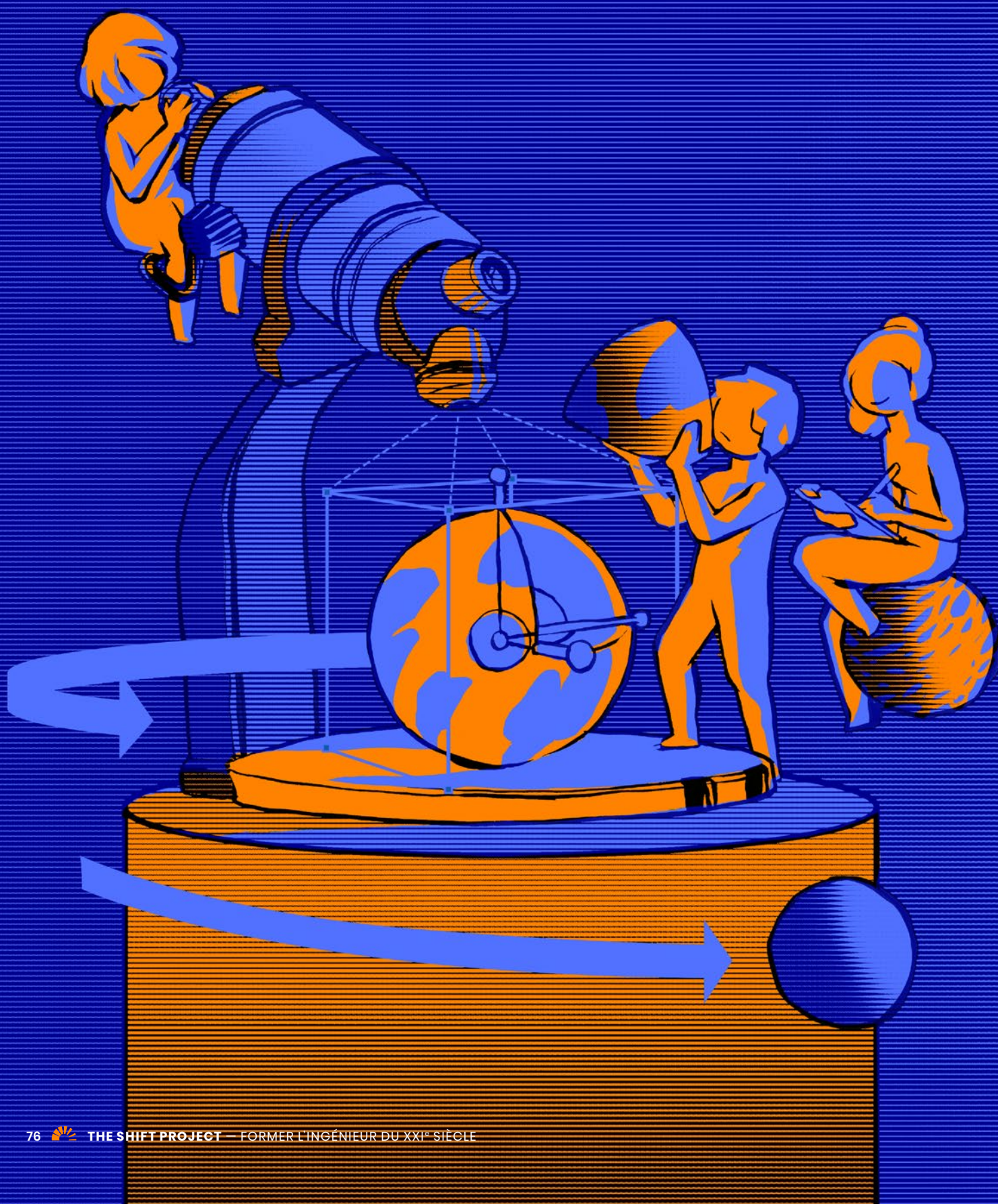
Pour aller plus loin

Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)

Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO)

IDDR, Quelle base scientifique pour la justice climatique ?, 2019

Fort des constats précédents, nul ne peut prétendre détenir le mode d'emploi pour faire face à l'Anthropocène. **Ce document n'est donc pas un « programme » mais une contribution, une proposition, une base de discussion, un guide discutable et à discuter, à faire évoluer, permettant de fixer quelques repères dans la bifurcation nécessaire de notre société et, a fortiori, des écoles de l'enseignement supérieur français.**



CHAPITRE 3

Birfurquer vers une société résiliente

QUELLES INGÉNIERIES ET TECHNIQUES?



On aura compris le rôle fondamental de la technique et de l'ingénierie dans l'anthropocène. Si les décisions politiques, les pressions de la part des citoyens et d'associations sont indispensables à adresser les enjeux du XXI^e siècle, l'ingénierie doit également prendre sa part et assumer les responsabilités que ses capacités lui obligent. Rappelons-le, ce que nous appelons « ingénierie(s) » est une manière de concevoir des systèmes techniques (production, maintenance, management, etc.) afin de transformer une idée abstraite en un objet concret, grâce à un ensemble de techniques.

Comment transformer l'héritage des ingénieries ?

En analysant l'héritage des ingénieries actuelles (voir ch. 1) et en questionnant les futurs souhaitables, voici les principes fondateurs sur lesquelles les ingénieries pourraient se fonder :

- **Compatibilité avec les limites planétaires et les ressources disponibles.** Changement climatique, effondrement de la biodiversité, perturbation des cycles de l'azote et du phosphore, acidification des océans, usage des sols et de l'eau douce, déplétion de la couche d'ozone, aérosols atmosphériques et pollution chimique doivent rapidement cesser d'être accélérés par les pratiques d'ingénierie. Les ressources notamment minérales sont disponibles en quantité limitée et les services écosystémiques sont pour beaucoup surexploités. En conséquence, les techniques d'ingénierie doivent mesurer leur contribution directe et indirecte à ces limites et intégrer leur diminution radicale comme critères de conception.
- **Compatibilité avec les objectifs sociétaux les plus unanimes :** paix et justice, santé, éducation et réduction des inégalités. Ce lien entre ingénieries et objectifs sociétaux doit être fortement resserré. Les critères de conception et les outils décisionnels et managériaux doivent se transformer pour y répondre.

De ces deux fondements, il découle des conditions nécessaires pour les ingénieries :

- **Adopter une posture réflexive et de progrès continu,** en se penchant sur leurs propres pratiques, sur leurs responsabilités, sur leurs manières de répondre aux enjeux socio-écologiques, sur les détournements et effets rebonds dus à certaines technologies, sur la manière dont les choix techniques sont pris et les dilemmes résolus. Elles doivent également enquêter et s'interroger sur les modes de vie qu'elles engendrent, ainsi que sur les relations faites entre les différentes technologies, les humains et les non humains. Quelles valeurs les ingénieries souhaitent-elles porter ?
- **Permettre la sobriété matérielle et énergétique aux usagers,** particuliers comme professionnels. (Re)questionner les besoins réels est une étape centrale vers la résilience. Evaluer dans quelles mesures l'existant ne permet pas d'y répondre, concevoir selon des critères de réparabilité, durabilité, mutualisation, interopérabilité, compatibilité (ancien-nouveau), fonctionnalité, recyclabilité réelle. Les techniques d'ingénierie permettant le déploiement des principes du (neuro-)marketing et d'autres influences induisant surconsommation, aliénation au travail et dans la vie personnelle doivent renverser la vapeur et favoriser l'autonomie et la libération des individus, comme dans le domaine du numérique.

- **Permettre la régénération du vivant.** Il s'agit en tout premier lieu d'éviter les dégâts et donc de développer des techniques limitant les destructions et pollutions. Ensuite, permettre à cette biodiversité de pouvoir se restaurer, se développer. L'observation du fonctionnement du vivant, des altérations qu'il subit et des conditions nécessaires à son bon développement, peut permettre de mettre en place différentes approches : techniques de restauration, systèmes de co-production pour les besoins humains et les besoins de cette biodiversité. Une production durable de matériaux biosourcés et de services écosystémiques (séquestration carbone, épuration de l'air et des eaux...) est ainsi possible.

Comment y parvenir ? Avant de rentrer plus précisément dans les techniques, réalisons qu'aujourd'hui même les productions les plus destructrices du vivant et de la structure sociale se fondent souvent sur des connaissances scientifiques et techniques de l'ingénieur (étude des propriétés physico-chimiques des matériaux, lois de la mécanique ou de l'électromagnétisme, modélisation, processus...). Les high-tech sont omniprésentes dans une grande partie du monde et sont responsables de nombres de maux, de consommations de ressources gargantuesques, en passant par le changement climatique et d'autres externalités négatives ; et elles sont tout à fait fondées sur la science et les techniques. Cependant, cela signifie qu'une partie des connaissances sont créées sans nécessairement viser à répondre à des objectifs éthiques. Comment l'ingénierie peut-elle tenir compte d'impacts sociaux, de la raréfaction des matériaux, du changement climatique, de l'effondrement de la biodiversité ? Si le but de la science peut être considéré comme une question philosophique, dans le domaine des ingénieries en Anthropocène, il semble évident qu'il est **nécessaire d'orienter une partie significative de la recherche et de la production de connaissances afin de répondre à la crise socio-écologique.**

Gardons en mémoire à quel point la culture scientifique et technique occidentale irrigue le monde et a tendance à masquer d'autres formes de savoirs (locaux, ancestraux, autochtones, créoles⁵⁶, etc.) utiles à la préservation et régénération de la nature et de la structure sociale⁵⁷. **Une diversité de points de vue permettrait de sortir d'une vision trop monolithique des techniques.**

56. Selon l'historien anglais David Edgerton : « une technique qui trouve un ensemble d'usages originaux en dehors du temps et du lieu où il a été initialement utilisé. » Par exemple : les variantes imaginées massivement autour du vélo : vélomoteurs, cyclopousse ou pousse-pousse, ou encore l'utilisation des moteurs de pompe d'irrigation pour transformer des bateaux traditionnels en bateaux à moteurs. Pour la construction : l'utilisation de la tôle ondulée dans les pays pauvres.

57. UNESCO, « Mobilisation des systèmes de savoirs », s. d.

COMMENT TRANSFORMER L'HÉRITAGE DES INGÉNIERIES ?

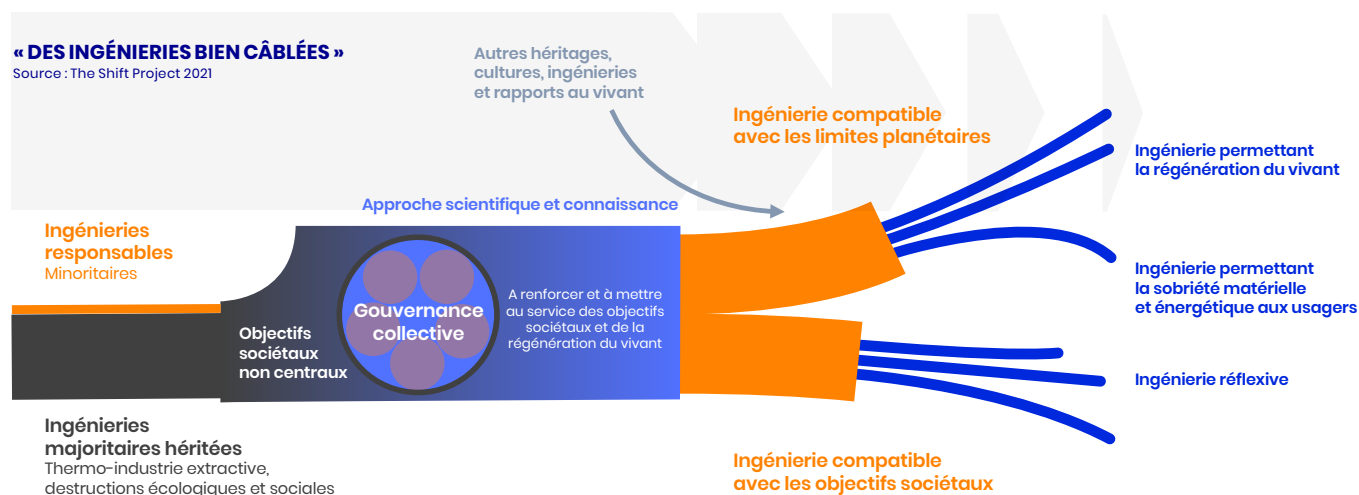
Il en est de même pour les visions que se font les humains de la « nature ». Cette question est d'importance car, après la prise de conscience du caractère global de la crise environnementale dès le milieu du XX^e siècle^{58, 59}, l'historien des techniques Lynn White prouvera en quoi **l'origine de cette crise provient de la relation des humains à la nature**⁶⁰.

Après avoir été perçue comme une ennemie, elle est désormais majoritairement vue comme un réservoir de ressources, dans lequel nous y puisons nourriture et matériaux, enfouissons nos déchets et polluons les milieux, en vue d'améliorer notre santé, de développer notre confort, notre richesse... **Cette vision utilitariste envers l'environnement n'est pas partagée unanimement** et de nombreuses communautés ont d'autres considérations. La nature peut être comprise comme l'environnement indispensable à l'humain pour survivre physiquement, culturellement et spirituellement – à protéger donc, ou encore comme l'ensemble du vivant incluant les humains, ou bien comme une communauté biotique dont les espèces ont toutes

moralement droit de vie, ou comme un ensemble d'espèces ayant toutes un potentiel d'évolution génétique que l'on ne saurait empêcher par leurs destructions, etc.

Vouloir dépasser ce moment où les ingénieries majoritaires sont destructrices du vivant et de la structure sociale et sont incapables de faire leur introspection dans un monde bridé par la finance et le primat de l'économie et alimentent une vision utilitariste de la nature, n'indique pas le chemin à emprunter pour arriver à ces objectifs plus louables de réflexivité et de compatibilité avec de bonnes conditions de vie pour toutes les espèces. Des décisions devront être prises et cela ne peut se faire sans une **gouvernance collective éclairée**.

Nous aurons probablement besoin de plus d'intelligence pour utiliser moins de matière, voilà qui peut rassurer les établissements formant les ingénieurs et ingénieures de demain quant à leur rôle d'éducation et de formation de « têtes bien faites ».



58. Rachel Carson, « *Silent Spring* », 1962

59. Roger Heim, « *Un naturaliste autour du monde* », 1955

60. Catherine Larrère, « *Ce que sait la montagne* », La Vie des idées, 30 avril 2013.

Quelles trajectoires pour l'ingénierie et les techniques ?

L'ingénierie permet donc de transformer le monde ; elle est imbriquée dans les allers-retours des processus techniques, sociaux, économiques et politiques. Il convient donc de trouver sa place et de chercher à proposer des trajectoires plus souhaitables. Gardons-nous de penser que les propositions suivantes sont prescriptives ou définitives. Loin de proposer une vision univoque, totalisante et fermée de ce que pourrait être l'ingénierie, il convient d'imaginer les trajectoires souhaitables des ingénieries et des techniques, au pluriel. A tous et toutes de décider ensuite, collectivement, lesquelles de ces trajectoires sont souhaitables.

1 — Éviter les nouveaux problèmes et désamorcer les actuels

Avant d'imaginer à quoi les ingénieries du futur (proche, nous l'espérons) pourraient ressembler, nous pourrions tout autant nous interroger sur ce qu'elles ne devraient pas être, ce à quoi elles ne pourraient plus contribuer pour aller vers une société résiliente. Si le terme « transition socio-écologique » est utilisé dans ce projet, notamment pour évoquer la notion de changement et de changement d'état, il peut tout aussi bien être galvaudé ou détourné s'il suggère une certaine continuité non porteuse de changements structurels. Ainsi, la transition énergétique n'a jamais eu lieu. Le charbon s'est ajouté au bois sans le remplacer, puis le pétrole au charbon sans le remplacer, puis le gaz et le nucléaire. En 1900 le charbon représentait 94 % de l'énergie produite mondialement avec 460 Mtoe⁶¹. L'avènement du pétrole durant le XX^e siècle aboutit en 2016 à une production de 4 750 Mtoe à partir de pétrole. Cependant cette même année la production d'énergie à partir de charbon était de 28 % de l'énergie mondiale, représentant 4 020 Mtoe soit une production 8,7 fois supérieure à celle de 1900. Contournons cet écueil, d'abord en renonçant à l'imaginaire d'une transition énergétique (ou d'un découplage PIB-émission de GES) et en adaptant nos techniques (renoncement à certaines, évolution d'autres, développement de nouvelles). **Choisir exige de renoncer, de s'engager pour des objectifs meilleurs, et cela peut se faire collectivement.**

Avant de chercher des voies plus souhaitables, cherchons à quoi faudrait-il donc renoncer. Tout d'abord, **renoncer aux mythes icariens**, c'est-à-dire aux futurs dans lesquels le progrès technique est la solution principale, voire la seule solution envisagée. Tel Icare se brûlant les ailes, nous risquerions de tomber de haut. Pensons par exemple aux « apprentis sorciers du climat » et de certaines promesses de géoingénierie.

Ou encore, l'idée d'une « conquête spatiale » qui permettrait à l'humanité de trouver de nouvelles ressources, voire un refuge. Également, **renoncer aux technologies zombies** qui sont incompatibles avec les enjeux car elles utilisent des ressources non-renouvelables (énergies fossiles et matériaux limités), elles sont obsolètes (« durabilité minimale en état de marche ») et encombrantes sous forme de déchet (« durabilité maximale sous forme de déchet »)⁶². Par exemple, certaines technologies numériques (6G, domotique généralisée...).

Enfin, **renoncer aux innovations dont la balance bénéfice/risques n'est pas clairement établie, notamment dans le domaine des high-tech**. Par exemple, faut-il développer la 6G alors que le déploiement de la 5G menace déjà de diminuer de 30 % la fiabilité des prédictions météorologiques⁶³ ?

Mais que garder ? A quoi ne pas renoncer ? Premièrement, **garder les technologies vivantes** qui utilisent des ressources renouvelables, ont une durée de vie maximale en fonctionnement et minimale sous forme de déchet⁶⁴. Deuxièmement, outre les industries ou services auxquels renoncer ou à reconverter, force est de constater que **certaines techniques high-tech nous sont aujourd'hui indispensables** pour des domaines tels que la santé ou la mise en communauté des scientifiques via internet. Là encore, des choix vont s'imposer. Parmi ces technologies coûteuses en matériaux et en énergie, une gouvernance collective, intégrant des parties prenantes élargies⁶⁵, pourrait permettre de piloter nos choix techniques judicieusement. L'ingénierie bien câblée vise à

61. Mégatonnes d'équivalent pétrole (Million Tonnes of Oil Equivalent)

62. Bonnet, Landivar, et Monnin, *Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement*.

63. Alexandra Witze, « *Global 5G Wireless Networks Threaten Weather Forecasts* », *Nature* 569, no 7754 (26 avril 2019) : 17-18.

64. Bonnet, Landivar, et Monnin, *Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement*.

65. En fonction des situations : entreprises, fournisseurs, associations, collectivités, usagers, citoyens, experts, chercheurs...

réduire la dépendance à des technologies gourmandes et à réduire leurs conséquences sur le milieu naturel et sur la structure sociale. Les enjeux éthiques et les effets rebonds possibles doivent être pris en compte.

Les ingénieries peuvent en tout cas être capables de contribuer à résoudre cette problématique en développant des savoir-faire : comment renoncer ? **Les techniques d'enquête** permettent, dans un premier temps d'identifier les techniques auxquelles renoncer (ne pas faire ou fermer) en cartographiant les liens avec les technologies que nous utilisons. Ces liens peuvent tout à fait être adaptés à un besoin précis et être compatibles avec les enjeux. A l'inverse, ils peuvent ne pas être adaptés en créant le besoin auquel ils prétendent répondre et être incompatibles avec les enjeux (surconsommation, surefficience, etc.). Ces techniques d'enquête participent à **l'évaluation des technologies**. L'évaluation peut par exemple permettre d'identifier le niveau de **dette technique et morale** (*technical debt*) engendré par le développement d'une technologie, notion beaucoup utilisée dans le domaine de l'informatique (codage et intelligence artificielle) mais qui peut être appliquée à d'autres domaines⁶⁶. L'évaluation peut être couplée à des **protocoles de renoncement**⁶⁷ qui constituent un support à la prise de décision.

Dans un deuxième temps, les **techniques de démantèlement et de restauration** des écosystèmes existent mais ne sont pas au cœur de l'enseignement. **Il est encore plus rare d'entendre parler de reconversion d'usines, d'ouvrages ou de centres de tri au service des objectifs sociétaux et de la régénération du vivant.** L'usine de production de pompes à injection diesel Bosch à Vénissieux a ainsi tenté une première reconversion en usine de production de panneaux photovoltaïques suite à plusieurs plans sociaux. Malgré cet échec lié aux conditions du marché, une nouvelle expérience a lieu sur une friche attenante : un nouveau modèle d'industries en ville, non polluantes et avec peu de stockage pour favoriser une bonne densité d'emplois⁶⁸. Des compétences et des ingénieries assez spécifiques ont été mises en œuvre pour la première reconversion, notamment le travail très collectif sur les compétences locales, l'expertise en maîtrise organisationnelle et les qualités communicationnelles⁶⁹. Des compétences montrant que les techniques organisationnelles et de gestion au sens large sont fondamentales dans cette ingénierie du renoncement, du démantèlement et du désinvestissement que l'économiste Diego Landivar, le professeur Emmanuel Bonnet et le philosophe Alexandre Monnin nomment « ingénierie de la fermeture ».⁷⁰

Enfin, pratiquer l'ingénierie au plus près de son territoire⁷¹, c'est-à-dire localement, en prenant acte de l'existant (contexte social, historique et technique) ainsi que des conséquences

propres du changement climatique (perturbations locales : inondations, crues, submersions, canicules, etc.) permet de donner des réponses plus adaptées.

2 — Concevoir pour la résilience

Le terme de résilience est utilisé dans de nombreux domaines, à la fois à l'échelle individuelle, lorsqu'il est utilisé en psychologie par exemple ; et à l'échelle collective, lorsqu'il est utilisé pour décrire des systèmes (société, écosystème, économique...), des pratiques managériales ou utilisé comme concept politique. Dans les deux cas, la résilience ne peut pas désigner un simple « retour à l'équilibre ». **Comment faire alors pour pratiquer une ingénierie de la résilience ? Et qu'est-ce que cela signifie ?**

Au niveau individuel, l'ingénieur peut appliquer le concept à soi ou aux autres. Appliqué à soi, l'ingénieur dans l'Anthropocène est vulnérable car sa seule action individuelle ne sera jamais suffisante. Cela peut provoquer un stress pré-traumatique appelé **solastalgie ou éco-anxiété** (tristesse, anxiété, insomnie, anorexie, dépression, sensation d'être démuné...). L'ingénieur doit-il pour autant être résilient ? Seulement si la résilience individuelle est entendue comme **la capacité d'un individu à, non seulement absorber un choc, mais aussi à en comprendre les causes structurelles. Il s'agira donc d'une part de participer activement à l'adaptation et à l'anticipation nécessaires face aux chocs, d'autre part d'agir sur les causes structurelles de ces chocs, sans oublier de s'adapter lui-même afin de préserver sa santé physique et psychique.** L'ingénieur doit être conscient des limites de la résilience et veiller à les prendre en compte. Sinon, il encourt notamment le risque de sur-responsabiliser l'individu, ce qui a pour conséquence de pointer ceux qui ne peuvent s'adapter (souvent les plus pauvres, les plus vulnérables et les premiers touchés). De plus cela peut déresponsabiliser des structures bien plus en mesure d'agir (système économique, managérial, etc.), en soutenant que c'est l'individu qui doit absorber le choc puis s'adapter afin d'être socialement accepté. L'ingénieur est souvent amené à diriger des équipes (« ingénieur-manager »). L'usage de la résilience dans ce cadre doit faire l'objet de la plus grande prudence car elle « est indissociable du management en régime néo-libéral. La résilience est alors l'autre nom de la flexibilité et de la résignation. [...] Les salariés résilients correspondent au portrait-robot de l'employé idéal. [...] La flexibilité du résilient est la contrepartie de son impuissance politique ».⁷²

Au niveau collectif, appliquée à la société ou aux territoires, la résilience désigne ici « une société capable d'absorber les perturbations en se réorganisant ou en modifiant sa structure, tout en conservant ses fonctions essentielles, sa cohésion et

66. Shannon Vallor, *Technology and the Virtues: A Philosophical Guide to a Future Worth Wanting*, Oxford University Press, 2016. Voir également ses travaux sur l'éthique et l'IA.

67. Bonnet, Landivar, et Monnin, *Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement*.

68. « À Lyon, le projet d'aménagement Usin ravive la flamme industrielle en ville », Les Echos, 18 février 2020.

69. « Bosch Vénissieux, une reconversion réussie », Alternatives Economiques, consulté le 1 octobre 2021.

70. Bonnet, Landivar, et Monnin, *Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement*.

71. The Shift Project, *Stratégie de résilience des territoires*. Tome 1-3, 2021

72. Alexandre Gefen, « Résilience, vous avez dit résilience ? », AOC [Analyse Opinion Critique], octobre 2020.

ses capacités de gouvernance. »

Et de même que pour l'individu, elle doit permettre de s'attaquer aux causes structurelles des perturbations : « une transformation profonde des structures sociales, économiques et physiques des systèmes territoriaux est inhérente à la résilience telle que développée dans [le cadre des territoires]⁷³. » Attirons également l'attention sur **le risque d'actions contre-productives au nom de la résilience** : si la résilience, d'un territoire par exemple, n'est entendue que comme l'adaptation face aux risques, celui-ci pourrait construire des infrastructures très imposantes pour se protéger des crues ou inondations, doubler tous ses réseaux afin d'éviter les coupures de service, construire de grands entrepôts de stockage de denrées considérées comme indispensables, etc. et pourrait, par une certaine démesure, accélérer les émissions de GES et l'artificialisation des sols, à l'origine des catastrophes dont il souhaite se prémunir.

À noter

Le rôle de l'ingénierie étant de concevoir notamment des systèmes techniques pensés a priori et dont les effets durent dans le temps, elle pourrait tout à fait se donner les conditions pour intégrer :

- **d'une part, bien entendu, l'adaptation aux risques, en étendant l'analyse de risques, telle qu'elle se pratique aujourd'hui, aux risques socio-écologiques grandissants ;**
- **d'autre part, la limitation drastique des émissions de GES, de la destruction de la biodiversité, des impacts sociaux et sociétaux délétères, de l'utilisation des ressources les plus limitées dans la production, l'utilisation et la fin de vie des services et produits conçus.**

Voir en annexes une description plus détaillée de la résilience.

Mais comment les ingénieries pourraient-elles concrètement se transformer ? Appuyons-nous tout d'abord sur l'existant. Il existe en effet de nombreuses propositions, plus ou moins complètes, plus ou moins déployées, plus ou moins comprises dans leurs fondements, qui tentent de répondre à ces questions de manière spécifique ou générale : économie circulaire, écoconception, écologie industrielle et territoriale, basses technologies (low-tech), biomimétisme, économie symbiotique, etc. Le travail mené dans ce projet n'a pas prétention à proposer UNE ingénierie de référence. Cependant, il nous paraît plus pragmatique d'en identifier les concepts nous paraissant essentiels (certains se recoupent parfois), d'en proposer de nouveaux et de tenter de les articuler dans une vision plurielle, et surtout étagée dans l'effort à fournir pour y parvenir. **Ainsi les principes plutôt aboutis et partiellement**

déployés de l'écoconception, de l'économie circulaire (déjà assez englobante), et du biomimétisme (utilisé avec discernement) pourraient être massifiés très rapidement dans les enseignements d'écoles d'ingénieur et en entreprise. Les valeurs et concepts portés par les basses technologies nous semblent quant à eux encore mal compris par une majorité.

ALORS, QUE SONT LES LOW-TECH ?

« Les low-tech, par opposition aux high-tech, sont une démarche visant, dans une optique de durabilité, à questionner nos besoins réels et développer des solutions aussi faiblement « technologisées » que possible, minimisant l'énergie requise à la production et à l'usage, utilisant le moins possible de ressources / matériaux rares, n'infligeant pas de coûts cachés à la collectivité. Elles sont basées sur des techniques les plus simples possible, les moins dépendantes possible des ressources non renouvelables, sur des produits réparables et maintenables dans la durée, facilitant l'économie circulaire, la réutilisation et le recyclage, s'appuyant sur les savoirs et le travail humain digne. Cette démarche n'est pas seulement technologique, mais aussi systémique. Elle vise à remettre en cause les modèles économiques, organisationnels, sociaux, culturels. À ce titre, elle est plus large que l'écoconception⁷⁴. »

Cette définition relativement englobante a été proposée dans une note signée par un collectif hétéroclite composé d'ingénieurs, de représentants d'entreprises, d'écoles d'ingénieur, de chercheurs et d'étudiants⁷⁵. Elle permet de dégager nombre de caractéristiques **d'une ingénierie responsable, comme le questionnement du besoin de l'intérêt pour la société, la durabilité, la réparabilité, la « renouvelabilité » des ressources et les critères sociaux.**

Comprenons bien que la démarche low tech prône également l'autonomie des usagers. Il est devenu très difficile pour un agriculteur de régler ou réparer son tracteur, notamment à cause de la complexité des systèmes et de l'omniprésence d'informatique au code fermé. Pour une famille, réparer soi-même un lave-linge défectueux est désormais impossible sur de nombreux modèles, pour les mêmes raisons. Maîtrisons-nous l'interface graphique de nos smartphones, au fur et à mesure des mises à jour imposées ? Le philosophe Ivan Illich proposait de se diriger vers une société conviviale, dans laquelle *« l'outil moderne est au service de la personne intégrée à la collectivité, et non au service d'un corpus de spécialistes. Conviviale est la société où l'homme contrôle l'outil [...] L'outil juste [convivial] répond à trois exigences : il est **générateur d'efficience sans dégrader l'autonomie personnelle**, il ne suscite ni esclaves ni maîtres, il élargit le rayon d'action personnel. »* Enfin, *« la convivialité est la liberté individuelle réalisée dans la relation de production au sein d'une société dotée d'outils efficaces. »*⁷⁶. Dans la lignée de l'approche low tech, des ingénieries du XXI^e siècle pourraient développer l'autonomie et le contrôle des objets et services par les usagers.

73. Cerema, « La boussole de la résilience. Repères pour la résilience territoriale. », Les cahiers du Cerema, consulté le 27 juin 2021.

74. La Fabrique Ecologique, « Vers des technologies sobres et résilientes - Pourquoi et comment développer l'innovation 'low-tech' ? », 14 avril 2019.

75. Citons notamment Philippe Bihouix, essayiste sur les low tech et administrateur de l'Institut Momentum, Fabrice Bonnifet, Directeur Développement Durable & Qualité, Sécurité, Environnement du Groupe Bouygues, Marc Daras, Président du Groupement professionnel Centraliens « Ingénieur et Développement Durable », Thomas Désaunay, Administrateur de La Fabrique Ecologique, Thomas Guillemmou, Centre des Jeunes Dirigeants d'Entreprise, Arthur Keller, Spécialiste des vulnérabilités des sociétés industrielles et des stratégies de résilience, d'autres chercheurs et étudiants de l'ESR, etc.

76. Ivan Illich, La convivialité, 1973.

3 — S'aider du vivant, et l'aider également

Nous avons vu en quoi les ingénieries occidentales, et désormais mondialement reprises, reposent sur une vision linéaire de l'économie en extrayant des matériaux, en les transformant, transportant, utilisant puis jetant. **Une des caractéristiques saillantes de ces pratiques d'ingénierie est de fabriquer des objets inertes, la plupart du temps à partir de matières elles-mêmes aussi inertes comme le fer ou le silicium.** Certains de ces artefacts utilisent la matière issue du vivant, mais la plupart du temps comme simple matériau mort : calcaire, bois, cuir, coton... Dans ces cas, la question de la surexploitation ou du déséquilibre des écosystèmes se pose, ainsi que celui de la souffrance animale. Répondant à la recherche de puissance des sociétés dominantes, les ingénieurs peuvent aussi chercher à reproduire une fonction bien particulière offerte par le vivant et à l'optimiser grâce à ces artefacts inertes. Cette approche remplit tout à fait ses objectifs de puissance mais **délaisse également les avantages des systèmes du vivant, comme la multifonctionnalité, la résilience, la création de matière à partir des molécules environnantes, la recyclabilité intégrale, l'utilisation de peu d'énergie disponible localement, etc.** La maximisation d'une ou de quelques fonctions se fait souvent au détriment d'autres fonctions. L'ingénierie actuelle a tendance à « découper » les fonctions pour en augmenter la performance, même dans la plupart des approches s'inspirant du vivant. Ainsi si la forme du nez du train à grande vitesse japonais a été inspirée du bec du martin-pêcheur pour ses qualités de pénétration dans un fluide, ce nez de train reste un objet fabriqué à partir de ressources peu renouvelables et lointaines et demandant une grande quantité d'énergie pour sa production. D'autres exemples et domaines de recherche vont beaucoup plus loin : l'écoquartier du Séqu à Bayonne s'est notamment inspiré des plantes qui, comme les bâtiments, sont immobiles, demandent de la lumière naturelle, de l'eau et de la ventilation et sont soumis aux aléas géoclimatiques⁷⁷. Les bâtiments sont sur pilotis, orientés intelligemment, en fonction du soleil et des ombres portées, le tout sans couper aucun arbre préexistant. Dans la recherche, on envisage l'informatique à partir de molécules issues du vivant. Le stockage de données sur ADN pourrait se révéler beaucoup plus économe en énergie et étonnamment plus fiable dans le temps que les technologies actuelles⁷⁸. Le biomimétisme, au sens large, recèle un réel potentiel pour des pratiques d'ingénierie responsables, potentiel sur lequel nous reviendrons. Mais encore faut-il se mettre d'accord sur les termes et les pratiques recouvertes par les différents termes.

Les définitions et l'articulation entre les différents principes qu'en ont fait le centre d'études et d'expertises dédié au déploiement du biomimétisme en France (Ceebios) et le cabinet de Conseil Mycoco pour le Ministère de la Transition

Ecologique et Solidaire et pour France Stratégie nous semblent très pertinents, sans oublier l'ISO 18458.

- **La bio-inspiration** est l'approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques. Nous n'utiliserons pas ce principe dans ce document.
- **La biomimétique** est la coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, de leur abstraction en modèles et du transfert et de l'application de ces modèles à la solution. Ex. : un revêtement antibactérien imite la texture de la peau du requin et est utilisable dans les domaines de la santé ou du maritime, sans avoir recours à des antibiotiques ou à des peintures toxiques⁷⁹.
- **Le biomimétisme** comprend la philosophie et les approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (social, environnemental et économique)⁸⁰. Il prend racine dans l'observation du vivant (bio-inspiration) et est à l'intersection de l'écoconception, de la bionique et de la biomimétique. Ex. en cours de développement : une usine de production de moquette intégrée dans un écosystème et contribuant à son fonctionnement : purification de l'eau, séquestration du carbone, recyclage de la biomasse, création de sol fertile, etc.⁸¹.

À noter

La stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020 définit le biomimétisme comme une « démarche qui consiste à aller chercher [son] inspiration, pour une innovation durable, dans la nature, où l'on trouve des stratégies à la fois performantes (...) et résilientes pour synthétiser et dégrader des matériaux, se fixer ou se déplacer, stocker ou distribuer l'énergie, traiter l'information, organiser les réseaux et les échanges, et bien d'autres choses encore »⁸²

Il peut s'agir de comprendre les principes vus dans la nature et les imiter : formes et structures (ex : optimisation de l'aérodynamisme des véhicules), **fonctions ou propriétés** (ex : surfaces super hydrophobes), ou **organisations** (ex : modèles d'agroforesterie)⁸³.

77. CEEBIOS et VERTIGOLAB, « La Nouvelle-Aquitaine, une région bio-inspirée : Cartographie des acteurs et évaluation des retombées socio-économiques », avril 2018.

78. Martine Meireles-Masbernard, Laurent Nicolas, et Abdellah slaoui, *Inventer l'avenir : l'ingénierie se met au vert*, CNRS Editions, 2019.

79. « Exposition Bio-inspirée - Le fil de l'innovation - Crédits », consulté le 7 octobre 2021.

80. CEEBIOS et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, « Biomimétisme en France - Un Etat des lieux », juillet 2018.

81. « Exposition Bio-inspirée - Le fil de l'innovation - Crédits ».

82. CEEBIOS et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, « Biomimétisme en France - Un Etat des lieux ». Autre vision assez proche, celle du biologiste, océanographe, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie, Sorbonne Université et Président du Conseil Scientifique de l'Agence Française pour la Biodiversité, Gilles Bœuf : « Cette démarche n'est pas du tout une nouvelle science ou une nouvelle discipline mais plutôt une méthodologie ou mieux une approche transversale, voire une « philosophie », applicable dans nombre de domaines scientifiques et techniques et susceptible d'apporter des « réponses » aux questions techniques ou organisationnelles que l'on se pose aujourd'hui, pour ou hors du vivant »

83. Chrystelle Roger et al., « Restitution de la journée de travail « Biomimétisme » du 29 novembre 2019 chez France Stratégie - Ceebios, Mycoco - », s. d.

Le biomimétisme est encore peu utilisé en ingénierie en France, bien qu'il soit plus développé aux États-Unis et en Allemagne. Les principes du biomimétisme utilisent des approches d'abstraction robustes déjà éprouvées dans d'autres domaines tels que le design thinking, la propriété intellectuelle, etc. Sa spécificité est d'aller questionner une base d'exemples peu connue, celle de la biologie et du vivant, permettant alors d'identifier des solutions techniques alternatives à des problèmes récurrents dans l'ingénierie « traditionnelle ». Ces principes pourraient contribuer un certain saut paradigmatique nécessaire afin de contribuer à répondre à l'Anthropocène, que ce soit par le changement de relation à la nature qu'il implique aussi bien que par les potentiels (sans occulter les risques) qu'il recèle.

DE NOMBREUX POTENTIELS...

Le biomimétisme offre de nombreuses opportunités biologiques pour l'innovation⁸⁴, comme par exemple :

- ▶ Des matériaux multifonctionnels, réactifs à l'environnement, auto-assemblés, stockant le CO₂...
- ▶ Un stockage moléculaire de l'information, une catalyse de l'intelligence collective,
- ▶ La purification et la récupération de l'eau,
- ▶ La chimie verte,
- ▶ De l'inspiration pour l'économie circulaire et pour la ville régénérative (ex: bâtiments et infrastructures fonctionnant en écosystèmes, accueillant la biodiversité, purifiant air et eau)

La biomimétique n'atteint son plein potentiel que lorsqu'elle est couplée avec celle du biomimétisme. « *La nature, de façon indéniable, possède des stratégies d'optimisation de ressource encore inégalées par nos technologies actuelles, aussi modernes soient-elles. (...) Elle devient alors un outil d'innovation extrêmement efficace, couplé d'un moyen de remettre en question, de façon pertinente, nos besoins et notre façon de concevoir pour y répondre.* »⁸⁵

Le biomimétisme a été « identifié comme susceptible de répondre à 10 des 17 objectifs du développement durable, objectifs mondiaux définis par l'ONU »⁸⁶. Citons par exemple :

- ▶ **L'ODD 3 Accès à l'eau salubre et à l'assainissement :** ChemBioPharm et IMBE s'inspirent du mucus des méduses pour développer un système de filtration au niveau nanoscopique afin d'assurer une dépollution
- ▶ **ODD 11 Villes et communautés durables :** Basilisk développe des bétons auto-cicatrisants grâce à des bactéries encapsulées sécrétant de la matière pour combler les

fissures. La phyllotaxie⁸⁷ des plantes inspire In Situ Architecture pour un algorithme d'aménagement de quartier, notamment en termes d'ensoleillement.

- ▶ **ODD 12 consommation responsable :** Ecovative conçoit et produit des emballages sur-mesure à base de mycélium, biosourcés et compostables.

Du côté de l'emploi et des filières industrielles et de tous les secteurs d'activité :

- ▶ La région Nouvelle-Aquitaine évalue à 31000 la création d'emplois liés au biomimétisme d'ici 2028⁸⁸, tandis que les États-Unis envisagent la création de plus de 2 millions d'emplois d'ici 2030, « *notamment dans la construction, la chimie, l'énergie, l'électronique, les transports, les télécommunications et le numérique.* »⁸⁹
- ▶ « *S'inspirer du vivant ouvre ainsi des perspectives incomparables pour les futures capacités structurantes des filières industrielles et de tous les secteurs d'activité, que cela soit l'énergie, l'agriculture, l'économie bleue⁹⁰, les métiers du bâtiment (architecture, construction et les infrastructures), la santé, la cosmétique, le transport (automobile, aéronautique, naval, etc). Le biomimétisme répond notamment à des objectifs de performance opérationnelle aussi bien dans le domaine des matériaux, de la chimie, de l'ingénierie tissulaire, de la santé, des énergies ou bien encore du traitement de l'information. En outre, par son potentiel d'innovations disruptives dans tous les secteurs, le biomimétisme s'impose comme un domaine souverain* »⁹¹

À noter

Le biomimétisme ouvre le champ des possibles, a la capacité de donner une nouvelle impulsion en se basant sur l'observation du vivant. Elargir ainsi notre horizon pourrait offrir la bouffée d'optimisme nécessaire pour opérer une réelle transition. Il est plus facile de se diriger vers un désir que de renoncer à un plaisir, à un confort ou au statu quo. Le changement de paradigme qu'il implique questionne nécessairement nos rapports aux objets et à leurs origines, ainsi que notre vision de la nature, désormais plus perçue comme une ennemie ni une victime, mais plutôt une alliée. Le biomimétisme pourrait donc également nous aider à développer un sentiment de fraternité et à nous considérer comme des « compagnon-voyageurs »⁹² des autres espèces, sur ce vaisseau isolé qu'est la Terre.

84. CEEBIOS et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, « *Biomimétisme en France – Un Etat des lieux* ».

85. « *Le biomimétisme, un outil d'innovation durable* », Techniques de l'Ingénieur (blog), consulté le 8 septembre 2021.

86. Roger et al., « *Restitution de la journée de travail « Biomimétisme » du 29 novembre 2019 chez France Stratégie – Ceebios, Myceco –* ».

87. Partie de la botanique qui étudie la disposition des feuilles sur les tiges des plantes. Source CNRTL.

88. CEEBIOS et VERTIGOLAB, « *La Nouvelle-Aquitaine, une région bio-inspirée : Cartographie des acteurs et évaluation des retombées socio-économiques* ».

89. Roger et al., « *Restitution de la journée de travail « Biomimétisme » du 29 novembre 2019 chez France Stratégie – Ceebios, Myceco –* ».

90. Activités économiques liées aux océans, aux mers et à leurs côtes

91. Roger et al., « *Restitution de la journée de travail « Biomimétisme » du 29 novembre 2019 chez France Stratégie – Ceebios, Myceco –* ».

92. Larrère, « *Ce que sait la montagne* ».

... ET QUELQUES RISQUES

Une centrale à charbon bio-inspirée en forme de volcan, avec panache de fumées et de particules

Un nano-robot tueur emporté par les moustiques, biomimétique du parasite vecteur du paludisme

De nombreux secteurs peuvent être concernés par la biomimétique. Il s'agit de prendre garde et de ne pas faire de l'ingénierie « *as usual* »⁹³. Imiter quelques fonctions isolées de la nature ne suffira pas et pourrait être contreproductif. De même que pratiquer l'écoconception sans le biomimétisme, ou qu'aspirer à une utopie d'économie circulaire avec des matériaux inertes pour la plupart difficilement dégradables ou réutilisables/recyclables. **Une approche (éco)systémique des problématiques s'impose**, rappelons-le.

Le Vice-Président du Conseil Régional Région Nouvelle Aquitaine, en charge de l'environnement et de la biodiversité nous rappelle également que « *si nous ne sommes pas vigilants, la bio-inspiration peut aussi renforcer le rapport utilitariste à la nature qui, on le constate tous les jours, est source de tant d'excès et de désastres environnementaux et humains.* »⁹⁴
La compétence éthique sera toujours indispensable, quels que soient le domaine ou les techniques.

Outre la bio-inspiration, la biomimétique et le biomimétisme, on pourrait proposer une quatrième catégorie allant plus loin :

Le biomimétisme biosourcé serait une approche interdisciplinaire, qui pourrait permettre de réintégrer les limites planétaires dans l'ingénierie, à l'instar des organismes vivants dans lesquels les principes de l'évolution ont naturellement fait émerger les objectifs de survie à long terme, d'utilisation d'énergie renouvelable (souvent solaire), d'utilisation d'éléments abondants dans l'environnement, de chimie à température et à pression modérées, de recyclage. **Il utilise nécessairement les matériaux, services et molécules rendus disponibles par le vivant en catalysant et en protégeant son action de manière responsable.**

Dans son ouvrage « *L'économie symbiotique* »⁹⁵, Isabelle Delannoy propose d'examiner plusieurs exemples d'études ou de réalisations qui correspondraient à l'idée de ce biomimétisme biosourcé :

- ▶ Des stations d'épuration à base de végétaux (phytoépuration) peuvent non seulement fournir quantité de matériaux (bioplastiques performants pour la filière auto, fibre pour parpaings légers et isolants, molécules pour la chimie ou la cosmétique...) mais peuvent également remplir plusieurs fonctions que ne sauraient remplir une station en béton : fournir des bols en bambou, une aire de pique-nique ou un nichoir à pivot ;

- ▶ La décontamination de sols pollués grâce à des plantes locales permet d'extraire des métaux lourds et de disposer de catalyseurs chimiques très performants, à bas coût et non polluants ;
- ▶ La construction en bois biosourcé (si local et non issu de monocultures) offre de nombreux avantages notamment concernant le coût, les émissions de GES ou l'isolation.

4 — Vers une ingénierie de la permanence

The Shift Project propose d'aller encore plus loin en proposant **l'ingénierie de la permanence**, une vision ambitieuse afin de répondre aux enjeux sociétaux et écologiques. Il s'agit de :

- ▶ **Proposer la vision d'un idéal à atteindre, guide de nos actions**
- ▶ **Choisir et articuler les principes d'ingénieries les plus pertinents en évaluant les impacts socio-écologiques**
- ▶ **Intégrer une gouvernance démocratique** des communs dans les choix techniques à faire
- ▶ **Questionner le rapport des humains au vivant** en visant à une réconciliation entre humains, animaux non-humains et monde végétal :

À noter

L'ingénierie de la permanence est une approche interdisciplinaire questionnant les besoins, maximisant la durabilité, la réparabilité, la mutualisation, la recyclabilité et l'autonomie à l'usage, mais permettant aussi une restauration ou une reconversion des systèmes destructeurs du vivant et du social, dans une gouvernance collective des communs.

Elle doit respecter les besoins des écosystèmes, en observant le vivant dans son ensemble et en appliquant ses principes avec des matériaux biosourcés et sans surexploitation.

Elle vise ultimement à réconcilier les humains avec le reste du vivant, dans une seule et même « nature ».

En suivant ces principes, cette ingénierie propose un idéal devant permettre aux écosystèmes et donc à l'humanité de vivre de manière permanente dans de bonnes conditions, voilà pourquoi on la qualifie d'ingénierie de la permanence.

93. Référence à l'expression anglophone : « *Business as usual* », traduisant la continuité du modèle économique actuel et une prétendue impossibilité de changer ce modèle

94. CEEBIO et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, « *Biomimétisme en France - Un Etat des lieux* ».

95. Isabelle Delannoy, *L'économie symbiotique*, Actes Sud, [Actes Sud] Domaine du possible, 2017.

L'ingénierie de la permanence



Le qualificatif « de la permanence » est également un clin d'œil aux fondateurs de la permaculture⁹⁶ (« *permanent agriculture* ») et fait surtout référence au fait que nombre de ses principes sont communs avec notre proposition. Rappelons à toutes fins utiles que la permaculture fut inventée « *afin de décrire un système évolutif et intégré de plantes pérennes, vivaces ou qui se perpétuent d'elles-mêmes et d'espèces animales utiles à l'homme* »⁹⁷ mais que son champ ne se limite pas à l'agriculture et peut tout à fait s'étendre à la technologie, à l'habitat ou à l'économie. Disposant de nombreux points communs avec le biomimétisme également, son approche est centrée autour de la conception des projets. Et ces projets doivent respecter des principes éthiques (prendre soin de la terre et des humains, et partager équitablement) et différents principes, comme l'observation attentive, la collecte et le stockage d'énergie, l'autorégulation, la valorisation des ressources et services renouvelables, etc.⁹⁸

Insistons un instant sur l'interdisciplinarité prônée dans cette ingénierie de la permanence, aussi bien que dans le biomimétisme. La crise socio-écologique a un caractère systémique. Elle touche toutes les régions du monde de manière différente, et ses causes et conséquences sont nombreuses et inextricablement liées à tous les domaines, comme les connaissances nécessaires à l'ingénieur nous l'ont montré. **Ce caractère transversal de la crise implique une réponse interdisciplinaire.** Le besoin de renforcer le travail en interaction avec les biologistes, les usagers, les pouvoirs

publics et les territoires est de plus en plus compris. Cependant **ce besoin d'interdisciplinarité se confronte avec l'approche réductionniste⁹⁹ historique dans les sciences**, ce qui peut provoquer incompréhension et impossibilité de dialoguer. Il le faut pourtant, car les deux approches sont indispensables et complémentaires.

5 — Quelles techniques souhaitables pour l'ingénierie de la permanence ?

Concevoir et produire des biens ou des services moins gourmands en énergie et en matériaux et plus respectueux du vivant et du social va exiger un savoir-faire encore plus pertinent des écoles, des étudiants futurs ingénieurs et des entreprises. **Moins de matériaux et plus d'intelligence en somme.** Nous pouvons établir plusieurs grandes catégories caractérisant l'activité de l'ingénierie. Les techniques de conception d'objets sont parfois les plus visibles ou connues. Mais elles ne sont pas les seules. Rappelons que le métier d'ingénieur englobe également la conception de services, d'organisations ou de processus, des activités décisionnelles, de déploiement et de maintenance des objets ou services conçus. L'ingénierie ne peut pas non plus se déployer sans les techniques d'enquête et d'observation, ni sans celles d'évaluation pour atteindre et vérifier que l'on atteint des critères donnés. Ainsi l'ingénierie peut-elle se découper en quatre familles de techniques : techniques d'enquête,

96. David Holmgren et Bill Mollison, *Permaculture One: A Perennial Agriculture for Human Settlements*, s. d.

97. David Holmgren, *Permaculture Principles & Pathways Beyond Sustainability*, 2014.

98. Holmgren.

99. Elle considère tout système réel comme la résultante agrégative d'un ensemble de sous-systèmes ou d'éléments qui le composent, l'explication des propriétés d'un système physique ne pouvant s'effectuer qu'à partir de propriétés plus élémentaires.

QUELLES TRAJECTOIRES POUR L'INGÉNIERIE ET LES TECHNIQUES ?

de conception, d'évaluation et de gouvernance. **Lors du processus d'ingénierie, de nombreux aller-retours s'opèrent entre les différentes techniques**, sans qu'un ordre figé ne s'impose, même si des processus sont souvent établis pour une bonne efficacité de la démarche et en vue de répondre aux contraintes et objectifs de l'organisation. Le découpage proposé est certainement critiquable à de nombreux égards ; il ne vise pas une inatteignable perfection de la représentation des multiples ingénieries existant, mais plutôt la mise en valeur des techniques indispensables à enseigner et utiliser dans l'optique d'ingénieries responsables.

LES TECHNIQUES D'ENQUÊTE s'appliquent à tous les domaines. Il s'agit d'analyser une situation, un besoin, une infrastructure, un dysfonctionnement, un cahier des charges... parmi les techniques citons la cartographie permettant par exemple de fournir une vision des parties prenantes d'un projet par catégorie d'acteurs, des représentations mentales (« *mind mapping* ») pour analyser les causes racine d'un problème complexe, ou encore les techniques d'observation du vivant. Ces dernières peuvent servir à établir une analyse de risques des potentiels dommages lors de la construction d'une infrastructure, à faire un état des lieux d'un site endommagé avant d'entreprendre une restauration écologique ou encore à concevoir un processus biomimétiquement grâce à une enquête sur les stratégies de communication ou d'échanges de molécules entre espèces. Les techniques permettant l'examen des pratiques mêmes des ingénieries sont un préalable indispensable à une action auto-corrective et continue dans le temps.

LES TECHNIQUES DE CONCEPTION doivent tout d'abord considérer une vue d'ensemble : les impacts seront à considérer tout au long du cycle de vie, quelle que soit leur nature. Considérer également les conséquences d'une généralisation des techniques retenues. La contribution à de nouveaux imaginaires, notamment techniques, est peut-être la notion la moins descriptible ou mesurable, la plus impalpable en somme. Pourtant, de nouveaux imaginaires comme des techniques qui rendent autonomes et que l'on contrôle facilement, ou qui s'intègrent harmonieusement dans leur écosystème peuvent être puissants car ils agissent profondément sur les représentations sociales. Ensuite, les techniques et principes proposés ont été découpés par cycle de vie : production, usage et fin de vie. Ils reprennent les principes de valorisation et de gestion des structures existantes, de résilience et donc d'économie circulaire et d'approche low tech, des principes du vivant décelés par le biomimétisme. Pour la production, il s'agit tout d'abord de reconvertir les infrastructures et techniques les plus nocives. L'utilisation de matériaux biosourcés sans surexploitation implique évite énormément d'externalités négatives. La minimisation la plus stricte des émissions de GES et d'utilisation de matière et d'énergie est un point essentiel. La partie usage doit tout d'abord s'attacher à questionner les

besoins. La durabilité, la réparabilité et la multifonctionnalité sont à favoriser. Les émissions de GES et l'utilisation de matière et d'énergie lors de l'usage et de la maintenance sont à minimiser. Si cela est possible, la génération d'externalités positives est à favoriser : production d'énergie ou de matière, purification de l'air ou de l'eau, etc. Les principes retenus doivent être compatibles avec le vivant (écotoxicité) et favoriser les meilleures conditions de travail pour les employés de chaque phase, d'usage pour les usagers, et d'autonomie pour tous. Toutes les techniques sont à mettre en regard des critères proposés dans les techniques d'évaluation.

LES TECHNIQUES D'ÉVALUATION mettent en évidence le besoin de respecter des critères responsables socialement et écologiquement parlant, et de pouvoir en conséquence mesurer les impacts positifs et négatifs dans de nombreux domaines. Étant donné la complexité des situations et la différence de nature entre les impacts, il est nécessaire de disposer de plusieurs indicateurs. La mesure, l'estimation, se fonde sur une première approche générale en utilisant **l'analyse du cycle de vie (ACV)** : la « *compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie* »¹⁰⁰. Elle offre l'avantage de donner une vision globale et de fournir des éléments permettant ensuite de quantifier les impacts sur le changement climatique, la biodiversité et les ressources notamment minérales. Dans un premier sous-groupe « Impacts écologiques, il s'agit plus précisément d'utiliser l'analyse environnementale du cycle de vie (AeCV). Concernant le changement climatique, c'est le **bilan d'émissions des GES** qui prédomine. Un indicateur englobant toutes les émissions de GES a été créé : la tonne équivalente CO₂, qui englobe en un seul chiffre les effets des divers GES (CO₂, méthane, etc.). Pour la **biodiversité**, la diversité des impacts des activités humaines et la complexité des structures et du fonctionnement du vivant rendent difficile la création d'un seul indicateur pertinent. Il faut certainement débiter par une approche générale des impacts avant de plonger dans la sélection d'indicateurs spécifiques à la situation. L'ACV, grâce à son « *approche holistique (tous les stades de vie des produits et services) et sa souplesse quant aux périmètres spatio-temporels, (...) son utilisation répandue, (...) pourrait assurer une cohérence de la démarche des acteurs* »¹⁰¹, et ce malgré certaines imprécisions et limites sur la biodiversité. Chaque étape majeure identifiée par l'ACV peut être complétée par une évaluation biodiversité grâce à un ou plusieurs indicateurs du cadre « Pressions – État– Réponses » (PER), comme ceux analysés¹⁰² par la FRB¹⁰³ et par l'ONB¹⁰⁴ : Global Biodiversity Score TM (GBS), Product Biodiversity Footprint (PBF), Biodiversity Impact Metric (BIM), variables essentielles de biodiversité (EBV) ... L'approche par ACV permet de dépasser l'estimation des impacts pour « enrichir la réflexion sur les réponses, c'est à dire les mesures à adopter pour limiter les pressions »¹⁰⁵.

100. « ISO 14040:2006(fr), Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre », consulté le 11 octobre 2021.

101. Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) et Office français de la biodiversité (OFB), « Indicateurs et outils de mesure : Évaluer l'impact des activités humaines sur la biodiversité ? », mai 2021.

102. Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) et Office français de la biodiversité (OFB).

103. Fondation pour la recherche sur la biodiversité

104. Office français de la biodiversité

105. Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) et Office français de la biodiversité (OFB), « Indicateurs et outils de mesure : Évaluer l'impact des activités humaines sur la biodiversité ? »

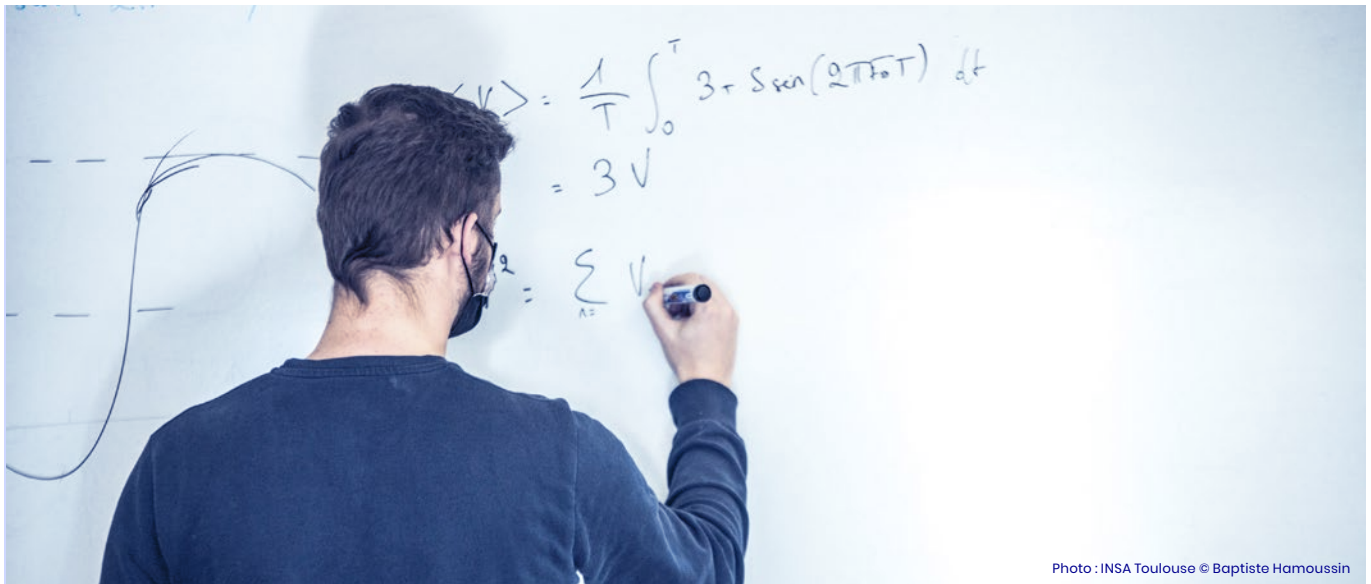


Photo : INSA Toulouse © Baptiste Hamoussin

Notons que les méthodes et indicateurs dans ce domaine sont en forte évolution, et que des plateformes d'échanges sur les méthodologies à employer, en entreprise par exemple, permettent d'avancer de manière pratique¹⁰⁶.

Le deuxième sous-groupe intègre les critères sociaux et sociétaux. Comment la production, l'utilisation et la fin de vie des produits ou services impactent différentes populations, qu'ils soient travailleurs, consommateurs, communautés locales, ou autres ? **L'analyse sociale du cycle de vie (AsCV)**, « technique d'évaluation des impacts sociaux et socio-économiques (réels et potentiels) positifs et négatifs tout au long du cycle de vie des produits »¹⁰⁷, permet d'identifier ces acteurs et les impacts positifs ou négatifs les affectant. Les catégories retenues sont les droits humains, la santé et la sécurité, la gouvernance, les conditions de travail, les répercussions socio-économiques et l'héritage culturel.

La compétence éthique permet de mettre en perspective ces résultats chiffrés et leurs limites avec tout ce qui peut permettre de rendre un jugement sur ces impacts : gravité des impacts par rapport à la situation socio-écologique, analyse des valeurs sous-jacentes à ce jugement, évaluation d'impacts non mesurables, etc.

LES TECHNIQUES DE GOUVERNANCE : Déployer une ingénierie compatible avec les limites planétaires, une ingénierie « bien câblée », « c'est **piloter nos choix technologiques**, les déploiements d'infrastructures et d'usages associés afin de préserver les apports essentiels »¹⁰⁸ des technologies. Les choix technologiques, c'est-à-dire les renoncements à certaines technologies et les développements d'autres, sont des choix sociétaux car ils ont des conséquences sur les usages, les dépendances, les futurs choix technologiques, etc. Le cas du numérique, analysé par The Shift Project ces dernières années, est parlant : « Les solutions connectées appelées communément « smart » ne sont plus aujourd'hui des solutions autonomes (« standalone »), mais les composantes d'un véritable « système numérique ». Les déployer doit se faire en toute connaissance de cause, soit en prenant en compte de manière exhaustive : les coûts des technologies (notamment énergétiques et consommation de ressources), leurs apports véritables par rapport à des technologies non-connectées et les effets indirects de leur déploiement (besoin de maintenance, appel de nouvelles infrastructures etc.). De plus, le « besoin » auquel elles répondent doit être réinterrogé par rapport à l'importance d'autres « besoins » non satisfaits. »¹⁰⁹

Pour choisir ces trajectoires technologiques collectivement et rationnellement, deux conditions sont indispensables : ouvrir les débats (gouvernance par les communs, démocratie technique...) et les objectiver (qualifier, quantifier, analyser...). Pour cela, la formation de l'ingénieur doit s'ouvrir à d'autres manières de faire (plus ouvertes et intégratives) et l'ingénierie doit **intégrer méthodes et indicateurs qui permettent d'évaluer les conséquences (positives comme délétères) des choix technologiques**. Ces méthodes et indicateurs, comme l'ingénierie en général, doivent être eux-mêmes évalués dans une **approche réflexive** et adaptés en fonction.

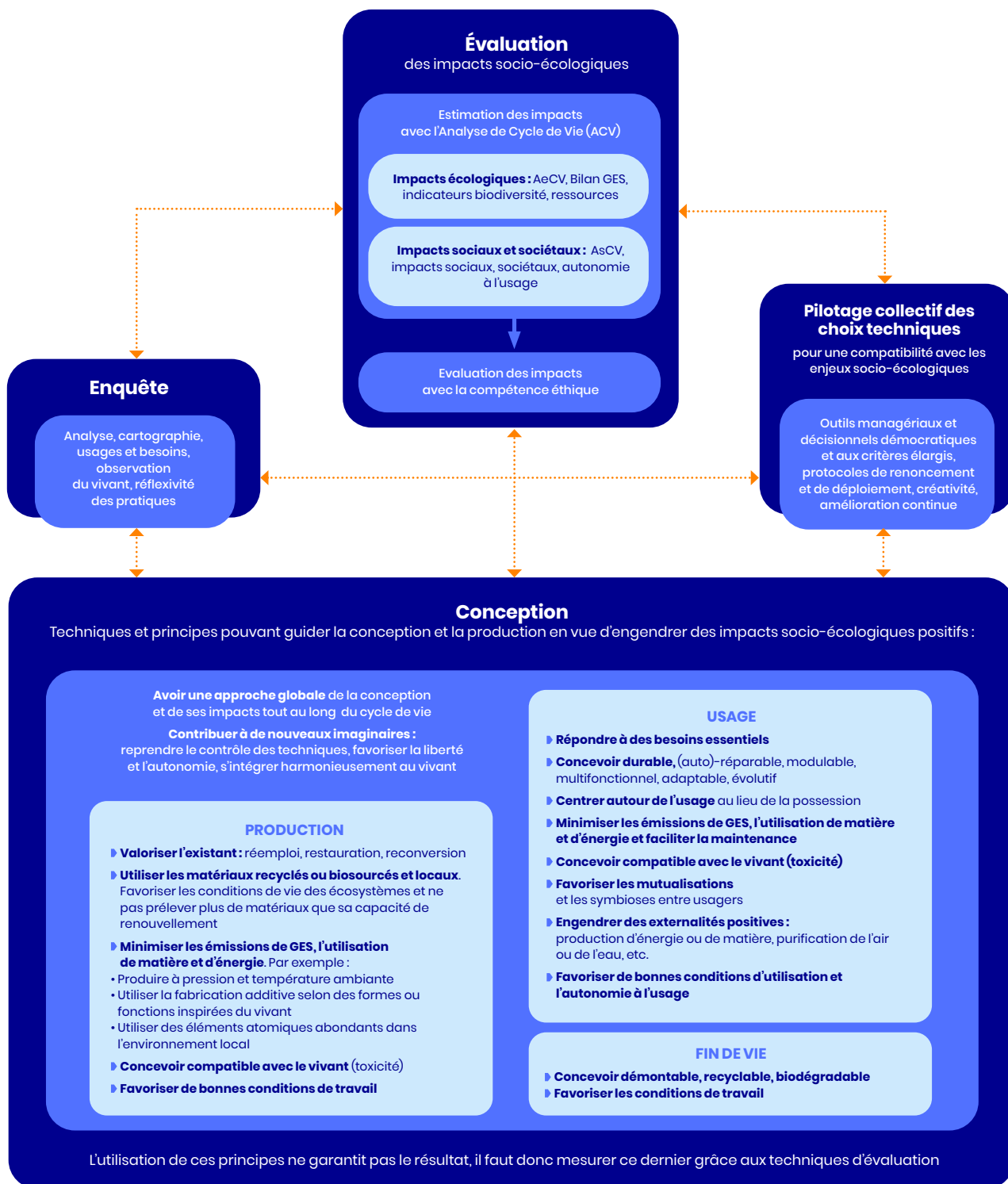
106. Citons par exemple *Aligning Biodiversity Measures for Business (ABMB)*, *Business@Biodiversity (B@B)*, Plateforme France RSE de France Stratégie, Organisation pour le Respect de l'Environnement dans l'Entreprise (ORÉE), Entreprises pour l'Environnement (EPE). (Source Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) et Office français de la biodiversité (OFB))

107. Programme des Nations Unies pour l'environnement, « Lignes directrices pour l'analyse sociale du cycle de vie (AsCV) des produits », 2009.

108. The Shift Project, « Déployer la sobriété numérique », octobre 2020.

109. The Shift Project.

Les techniques souhaitables pour l'ingénierie de la permanence



6 — Alors, quand enseigner ces techniques en école d'ingénieur ?

Proposons une ligne directrice aux écoles d'ingénieurs quant à la manière de développer l'enseignement de ces nouvelles techniques, notamment sur la question du déploiement temporel. Nous nous basons principalement sur **une approche mêlant pragmatisme et urgence** à les déployer. A cet effet l'ambition générale est élevée en proposant l'implémentation des nouveaux enseignements très rapidement : (quasi) immédiatement pour certaines, de l'ordre de quelques années au maximum pour d'autres. Mais la difficulté ou la facilité à les déployer dépend grandement de l'état de l'art actuel.

Ainsi les évolutions à conduire à très court terme reviennent principalement à déployer massivement des techniques existant déjà et étant très bien documentées : piliers de l'économie circulaire y compris l'écoconception, biomimétique, techniques de gouvernance responsable, renoncement aux innovations néfastes. A court terme, développer des techniques existantes et mais moins documentées, moins connues ou dont les applications ont été moins déployées : les principes des basses technologies qui ne sont pas déjà couvertes dans l'économie circulaire, le biomimétisme à une échelle plus large que l'imitation d'une simple fonction et les techniques de reconversion et de démantèlement qui seront nécessaires à la conduite d'une réelle transition.

À moyen terme le changement de paradigme pourrait s'accroître en systématisant les low tech et en soutenant le potentiel du biomimétisme grâce à l'utilisation des matières

issues du vivant, et étayé par une éthique solide. Déployer les techniques de gouvernance présentées précédemment à très court terme est un point central afin d'être capable d'opérer des choix les plus responsables.

La capacité à déployer les techniques les plus en rupture avec les pratiques actuelles va nécessairement devoir être largement accompagnée par la formation des enseignants, mais aussi par le développement de domaines de recherches, par le partenariat avec des entreprises en pointe sur ces sujets, et probablement aussi par la restructuration des filières de spécialité, ou au moins leur évolution. N'oublions pas également le besoin de développer des projets interdisciplinaires par exemple avec des biologistes.

À noter

On peut d'ores et déjà constater qu'un certain changement de paradigme de la vision de la technique s'amorce ici : choisir des high-tech parcimonieusement et non plus systématiquement, s'appuyer sur des low tech, être capable de renoncer, et recourir davantage au vivant et à ses principes.

Voir ci-contre une proposition de calendrier d'intégration des techniques souhaitables dans les écoles d'ingénieur, et en annexes des exemples de déclinaisons concrètes dans le domaine du numérique et de la construction.



Photo : ISIS Castres

QUELLES TRAJECTOIRES POUR L'INGÉNIERIE ET LES TECHNIQUES ?

INTÉGRATION DE PRINCIPES ET TECHNIQUES DANS LES ENSEIGNEMENTS

TRÈS COURT TERME : 0-1 AN

COURT TERME : 0-3 ANS

MOYEN TERME : 1-5 ANS

LONG TERME

INGÉNIERIES À MASSIFIER ET À DÉVELOPPER



Ecoconception & économie circulaire
Les 7 piliers de l'économie circulaire selon la définition de l'ADEME^A

Basses technologies (low tech)
Questionnement du besoin et de l'intérêt, grande sobriété matérielle, grande autonomie à l'usage^B

Résilience et techniques conviviales
Réflexivité propice à la transformation, adaptation, atténuation, liberté par la possibilité du contrôle d'outils efficaces^C

Biomimétique
Transferts de modèles
biologiques en vue des enjeux socio-écologiques^D

Biomimétisme
Approche interdisciplinaire prenant pour modèle les écosystèmes en vue des enjeux socio-écologiques^D

Biomimétisme biosourcé
Approche interdisciplinaire prenant pour modèle les écosystèmes et catalysant de manière responsable les productions du vivant en vue des enjeux socio-écologiques^E

Vers l'ingénierie de la permanence

- Approche interdisciplinaire
- Questionne les besoins, maximise la durabilité, la réparabilité, la mutualisation, la recyclabilité et l'autonomie à l'usage,
- Permet une restauration ou une reconversion des systèmes nocifs
- Suit une gouvernance collective des communs.
- Doit respecter les besoins des écosystèmes, et peut en appliquer ses principes avec des matériaux biosourcés et sans surexploitation.
- Vise à réconcilier les humains avec le reste du vivant

INGÉNIERIES À CONTINUER ET À FAIRE MUTER

Ingénieries high-tech
Certaines technologies nécessaires et choisies collectivement, en vue de répondre aux objectifs sociétaux notamment, comme la santé, ou aux enjeux écologiques, comme certaines techniques de séquestration carbone ou les systèmes d'observation climatiques et de la biodiversité. La dépendance aux high-tech, gourmandes en ressources et énergie, doit être réduite à chaque développement. Considérer les enjeux éthiques et les effets rebonds possibles, respecter les accords de Paris.

Techniques de reconversion
Reconvertir, rediriger ces outils de production au service des objectifs sociétaux et de la régénération du vivant.^{E,F}

Ingénieries de la fermeture

Techniques de renoncement
Protocoles de renoncement aux Innovations et développements incompatibles avec les objectifs sociétaux et les conditions de vie sur Terre^F

Techniques de démantèlement
Cesser les activités les plus émettrices de GES, les plus destructrices du vivant et du social, poussant au consumérisme et à la dépendance, notamment certaines high-tech. Inclue le recyclage et la restauration.^F

INGÉNIERIES COMPATIBLES
avec les enjeux socio-écologiques

INGÉNIERIES INCOMPATIBLES
avec les enjeux socio-écologiques

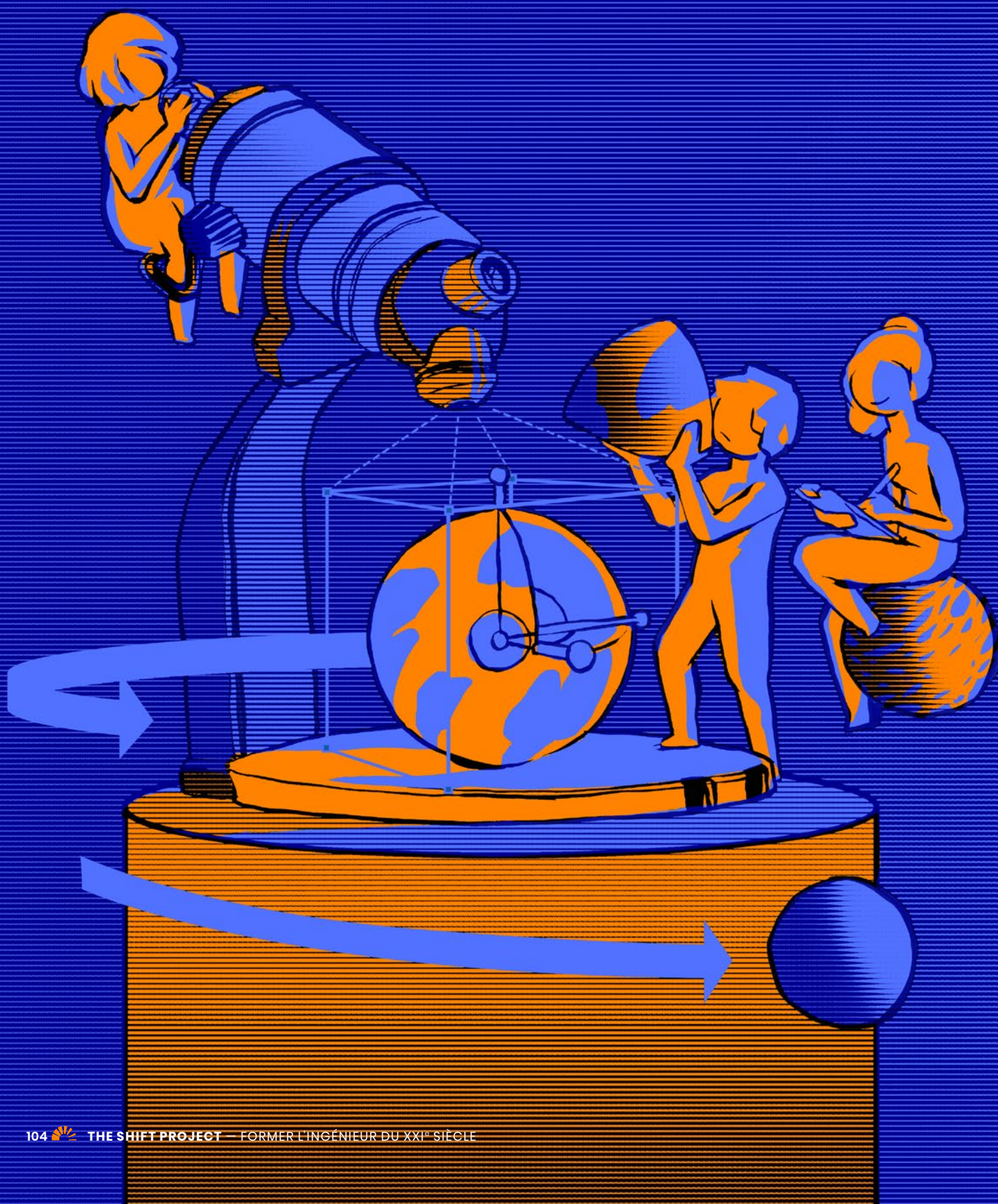
Sources - A : « L'économie circulaire », ADEME, consulté le 8 octobre 2021.

B : La Fabrique Ecologique, « Vers des technologies sobres et résilientes - Pourquoi et comment développer l'innovation "low-tech" ? », 14 avril 2019.

C : CEEBIOS et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, « Biomimétisme en France - Un Etat des lieux ».

D : CEEBIOS et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, « Biomimétisme en France - Un Etat des lieux » ; Delannoy, L'économie symbiotique ; Emmanuel Delannoy et al., « Pour un biomimétisme au service de la vie ! », Blog Pikaia, 16 octobre 2019

F : Bonnet, Landivar, et Monnin, Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement.



CHAPITRE 4

Agir dès maintenant

COMMENT FORMER LES INGÉNIEURS DU XXI^e SIÈCLE ?



Comment intégrer de nouvelles connaissances et compétences dans les cursus, tout en assurant une cohérence entre les enseignements, en s'appuyant sur des bases scientifiques, en donnant une place adéquate pour les SHS, en respectant la liberté pédagogique des enseignants, dans un contexte où les maquettes pédagogiques sont souvent bien remplies et où le temps disponible pour chaque enseignant est plutôt compté ? Si le puzzle semble complexe, **l'évolution des approches pédagogiques permet d'apporter certaines réponses**. Pour assurer une cohérence d'ensemble du programme et prendre en compte les différentes contraintes, l'articulation de différentes formes d'intégration des enjeux socio-écologiques dans les enseignements permet de trouver une adéquation entre objectifs pédagogiques et moyens à disposition : cours dédiés, intégration dans les cours, stages et projets existants, projets continus inter-promotions, etc.

En complément, le *Guide méthodologique* propose des étapes aux décideurs et de nombreuses pistes pour que chacune des parties prenantes contribue au projet de transformation.

Comment enseigner les enjeux socio-écologiques ?

1 – L'équilibre instruire-éduquer-former

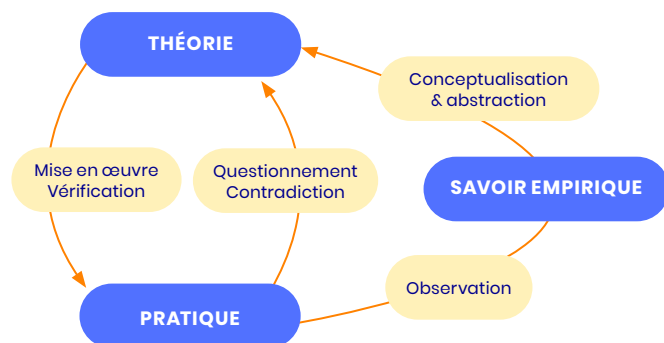
L'enseignement supérieur doit-il former, c'est-à-dire préparer à un métier ? Doit-il instruire, c'est-à-dire transmettre des connaissances ? Ou bien doit-il éduquer, c'est-à-dire préparer les individus au rôle qu'ils vont jouer dans la société ? **Il s'agit d'assurer un équilibre pertinent entre l'instruction, l'éducation et la formation afin de préparer de futurs professionnels capables de comprendre et d'agir en toute conscience dans un monde incertain¹¹⁰.**

Le risque de voir l'enseignement supérieur ne servir plus que l'intérêt de l'insertion professionnelle au détriment de l'éducation et de l'instruction est de plus en plus élevé¹¹¹. La mise en concurrence des établissements du supérieur sur le « marché des formations » européen et mondial risque d'accentuer les inégalités, les intérêts privés, etc. *Les Cahiers de la prospective* de l'INSA Lyon décrivent ces dérives potentielles d'un « Monde UltraliBERal, UBER » sur l'enseignement supérieur dans lequel « l'économie de plateforme devient la norme » et où l'ingénieur se retrouve de plus en plus face à des dilemmes éthiques¹¹².

Alors comment trouver cet équilibre dans les enseignements ? Quelles pédagogies mettre en place ? **La pédagogie ne se résume pas à quelque chose de linéaire et de caricatural comme le laisse suggérer l'opposition supposée entre une pédagogie « traditionnelle » et une pédagogie « innovante ».** La première désignerait une pédagogie descendante (par exemple les cours magistraux) d'un sachant actif vers des élèves passifs. La seconde, à l'inverse, désignerait une pédagogie où l'enseignant s'efface, laissant place à l'élève qui deviendrait le seul acteur de sa formation. Une vision qui semble plus proche de la réalité consiste à **considérer l'enseignement comme un cycle entre théorie, pratique et savoir empirique.** Théorie dans laquelle les différentes approches (instruction, éducation, formation) ainsi que les différentes méthodes (« traditionnelle » et « innovante » ou « frontale » et « active ») sont complémentaires. **Il est possible de partir aussi bien de la pratique que de la théorie, l'un venant se confronter à l'autre en l'infirmité ou le confirmant. Ce qui importe est que la pédagogie utilisée permette de faire participer l'élève à l'ensemble du cycle donc à l'ensemble du processus de construction du savoir^{113, 114}.**

CYCLE DU PROCESSUS PÉDAGOGIQUE

Source : d'après Nico Hirtt, 2020



2 – Pour l'enseignant, quelle posture permet l'équilibre théorie-pratique-savoirs empiriques et de dépasser le sentiment d'illégitimité à enseigner les enjeux socio-écologiques ?

Participer à un pilotage des techniques assurant une comptabilité avec les enjeux décrits dans la première partie implique une bonne compréhension des enjeux en présence. Or ces enjeux sont multiples, souvent de nature transversale et demandent une vision systémique pour bien comprendre les tenants et les aboutissants de cette crise socio-écologique. Comprendre les mécanismes du réchauffement climatique ne suffira pas à y remédier, il faut également faire le lien avec les émissions de GES, donc avec l'industrie, le transport et l'agriculture, mais aussi avec le système économique mondialisé et financiarisé, les modes de consommation, et la faible durabilité des produits conçus et vendus, entre autres facteurs.

110. Voir l'Objectif de développement durable n°4 : « Veiller à ce que tous puissent suivre une éducation de qualité dans des conditions d'équité et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie »

111. Léa Dang, Enquête « Les grandes écoles à la botte des multinationales », Socialter, 13 octobre 2020. Disponible en ligne (consulté le 21/01/2021)

112. « Les Cahiers de la prospective : exploration de l'environnement de l'INSA Lyon à l'horizon 2040 », INSA Lyon, juillet 2019. Disponible en ligne (consulté le 21/01/2021)

113. Nico Hirtt, Webinaire « L'école numérique et la classe inversée », Appel pour une école démocratique (APED), décembre 2020. Disponible en rediffusion (consulté le 23/12/2020)

114. Voir les travaux de David A. Kolb, notamment le « cycle de Kolb »

COMMENT ENSEIGNER LES ENJEUX SOCIO-ÉCOLOGIQUES ?

Ainsi, les enjeux socio-écologiques étant tellement présents (leurs causes et conséquences concernent tous les secteurs et toutes les disciplines) qu'il conviendrait certainement pouvoir faire le lien avec eux dans la plupart des enseignements.

Si certains cours dédiés sont peut être nécessaires (voir chapitre suivant), l'intégration aux cours classiques des formations semble faire sens : sciences dites « dures », sciences et techniques de l'ingénieur, sciences humaines et sociales.

L'intégration dans des projets et des activités professionnalisantes comme les stages peut être également particulièrement pertinente à cet effet.

Or, premièrement la plupart des enseignants-chercheurs ne sont pas experts des enjeux socio-écologiques. Deuxièmement, nous avons constaté que nombreux sont ceux qui ressentent un sentiment d'illégitimité à les aborder dans leur cours. Troisièmement, il est difficile d'aborder le constat des enjeux sans provoquer des réactions vives des élèves (pleures, peurs, effroi...) à court terme et un sentiment de détresse (voir l'éco-anxiété) à long terme. Ce dernier point se traduit souvent chez l'enseignant par une peur de faire peur.

Pour cause, les enjeux socio-écologiques sont rarement au cœur des sujets de recherche des enseignants-chercheurs. De plus, il est souvent attendu, dans une certaine vision traditionnelle de l'enseignement, que l'enseignant soit expert de toutes les questions qu'il aborde. Enfin, il peut être difficile d'équilibrer la partie « constat » avec la partie « solution » pour deux raisons : les ingénieurs et enseignants peuvent avoir le sentiment que les leviers politiques leur sont hors de portée ; et le rôle de la technique dans la transition n'est encore que très rarement discuté dans la formation. Par exemple : la technologie est-elle « la solution » pour la transition ? Comment la conception de produits et services peut-elle favoriser la sobriété et respecter des équilibres planétaires ?

Alors que faire ? A moyen et long terme, l'intégration des enjeux socio-écologiques de manière structurante dans la formation des ingénieurs implique une **formation des formateurs et l'intégration de ces mêmes enjeux dans la recherche** (voir volume 2 *Guide méthodologique*).

Or il est aussi possible pour les enseignants d'agir dès maintenant. Ils peuvent par exemple opérer un changement de posture : **passer d'une posture d'expert à une posture d'animateur**. Dès lors, il ne s'agit plus pour eux de partager leur expertise et leurs recherches mais bien d'animer la construction collective d'un savoir. Cela permet de passer outre le sentiment d'illégitimité et d'abandonner la position d'expert.

Retour d'expérience 1. Dans de nombreuses écoles, étudiants, enseignants-chercheurs et personnels animent ensemble des ateliers de la Fresque du climat et ses dérivées.

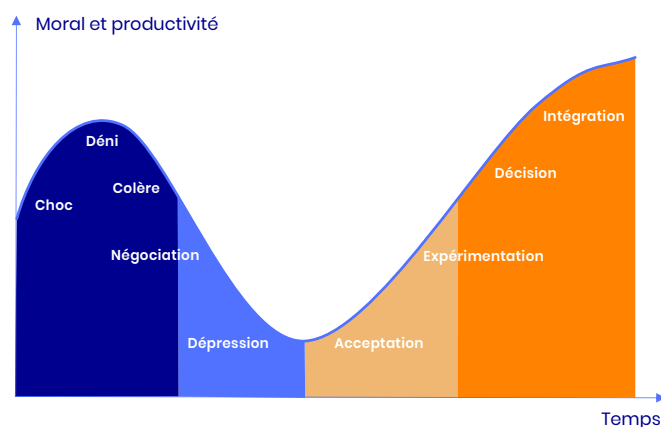
Retour d'expérience 2. Emmanuelle, directrice de département informatique dans une école du Groupe INSA, s'exprime à la suite d'un atelier organisé par le Shift Project sur la manière d'opérer ces changements dans le secteur du numérique, dans lequel les enseignants ont pu tester la posture d'animateur :

« J'en suis repartie [de l'atelier] avec :

- des éléments pour démarrer l'intégration des réflexions sur le sujet dans certains modules de cours.
- la conviction qu'il est temps d'initier ce travail
- moins d'appréhension à aborder ces sujets avec les collègues et les étudiants »

ÉTAPES DU CHANGEMENT

Source : Kübler-Ross



Lorsqu'on réalise qu'une situation est catastrophique, lorsqu'on est confronté à un choc, la peur est un passage quasi-obligatoire¹¹⁵. Ne s'arrêter qu'au constat dans la formation serait contre-productif et dangereux car cela éveille de l'anxiété voire de la détresse (éco-anxiété, solastalgie). **C'est pourquoi, après avoir posé le constat sur la base de nos connaissances scientifiques, il est nécessaire d'aborder des pistes de solutions qui font intervenir des dimensions politiques, économiques, techniques, etc.**

Mais comment l'enseignant peut-il aborder ces questions en faisant preuve d'objectivité, dans un contexte où chacune de ces pistes a des implications politiques et peut parfois être imprégnée d'idéologie ? L'important est peut-être dans la posture, justement. Il n'est pas interdit de parler de choix de sociétés, tant que l'esprit critique et l'analyse en sont la manière de les aborder, tant que l'enseignant ne se pose pas en sachant. Ainsi, l'étude analytique des enjeux de chacune des trajectoires possibles est une manière de parler de ces sujets et d'offrir aux étudiants une vision des possibles. L'analyse et la discussion des valeurs sous-jacentes à chacun des scénarios peuvent permettre à chacun de se positionner intérieurement, en fonction de ses convictions.

115. Voir les travaux de Elisabeth Kübler-Ross

3 – Quelques outils pédagogiques

Quels outils permettent de dépasser la traditionnelle distinction entre cours magistral, travaux dirigés et travaux pratiques ? Quels outils permettent ce déplacement d'expert à animateur ? **Nous proposons quelques outils issus des sciences de l'éducation, des expériences et initiatives menées dans différents établissements du supérieur, et de l'éducation populaire afin de faire le lien entre les savoir-faire, les savoir-être et les connaissances scientifiques et techniques des ingénieurs.**

Le modèle pédagogique dit « de Bloom » peut être utilisé pour permettre aux élèves d'acquérir des compétences et faire le lien entre connaissance, pratique et expérience. Ce modèle est composé de 6 niveaux : connaissance, compréhension, application, analyse, évaluation et synthèse¹⁰⁶.

Plus particulièrement, au regard des enjeux socio-écologiques, **The Shift Project a identifié des objectifs d'apprentissage pour l'ingénieur du XXI^e siècle**. Les 4 macro-objectifs constituent des repères pour penser les approches pédagogiques. Voir la partie *Bifurquer vers une société résiliente : quels rôles pour les ingénieurs* du présent rapport.



Le Manuel de la grande transition

propose également des postures pour les enseignants-chercheurs désireux de *faire autrement* pour aborder ces enjeux. Ils appuient par exemple sur une **démarche de questionnement** (il s'agit de chercher à poser correctement les problèmes avant de tenter d'y répondre), une **démarche holistique** (« tête, corps, cœurs » en ce qu'elle appelle à la fois à des processus

cognitifs, émotionnels et sensoriels), **une place particulière pour des interrogations épistémologique, anthropologique et éthique** « afin d'approfondir nos manières particulières de nous rapporter au monde, aux êtres humains et non humains, de définir le bien vivre. »

Enfin, le Manuel constitue une prise de position : c'est la *« défense d'une pensée engagée qui se veut ouverte au débat mais qui est orientée par une visée éthique qui conduit à désigner certains choix comme des impasses. »*

Voici deux exemples de pédagogies qui permettent de mettre en pratique ces différentes propositions d'approches.

La classe inversée

Des chercheurs au Center for Scholarly Technology de l'University of Southern California à Los Angeles définissent la classe inversée comme « *une approche ouverte qui:*

- met en œuvre des activités pédagogiques soutenues par la technologie numérique en dehors de la classe,
- favorise la différenciation de l'apprentissage au moyen d'une inversion d'activités conventionnelles autant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la classe,
- facilite les interactions entre les élèves et l'enseignant.

[...] La classe inversée combine les caractéristiques de plusieurs approches pédagogiques : la pédagogie active, la différenciation pédagogique, l'auto-apprentissage, l'apprentissage par les pairs, l'approche par résolution de problème ou l'apprentissage coopératif.¹¹⁷»

ATTENTION TOUT DE MÊME, « peu de recherches scientifiques ont démontré son efficacité à l'aide de données probantes. » Par ailleurs, l'utilisation massive d'outils numériques à l'école soulève de nombreuses questions sur les plans pédagogiques, écologiques, environnementaux, sanitaires, économiques et culturels¹¹⁸.

L'apprentissage par projet

Il constitue une entreprise collective dans laquelle chacun a un rôle actif et qui permet d'acquérir un ensemble de savoirs (notamment organisationnels) en vue de produire un résultat (répondre à une problématique, construire un prototype, etc.)¹¹⁹. C'est l'occasion pour les élèves de travailler sur des cas d'études théoriques ou pratiques au travers desquels les enseignants peuvent transmettre ponctuellement et au besoin, leur savoir¹²⁰.

PROJETS SUR DES CAS RÉELS :

- INSA Strasbourg & Emmaüs Mundo : « *En 2021, un partenariat a également été signé avec l'association Emmaüs Mundo (20), pour développer les savoir-faire de ses salariés et proposer aux élèves ingénieurs et architectes des projets autour de l'économie sociale, solidaire et circulaire* » Priscille Cadart
- INSA Lyon, Groupe Conception Production : intégration de principes low-tech dans des cours de conception mécanique

116. Benjamin S Bloom, « *Taxonomy of educational objectives. Vol. 1: Cognitive domain* », New York: McKay 20, no 24 (1956):1

117. Réseau CANOPE Ministère de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports, « *L'Agence des usages* », consulté le 8 décembre 2021.

118. Mélanie Guyonvarch, « Présentation de l'ouvrage de Ph. Bihouix et K. Mauvilly (2016), *Le désastre de l'école numérique. Plaidoyer pour une école sans écrans* », Formation emploi. Revue française de sciences sociales, no 139 (15 octobre 2017): 171-76.

119. Philippe Perrenoud, « Apprendre à l'école à travers des projets : pourquoi ? comment ? », consulté le 8 décembre 2021.

120. Catherine Reverdy, « L'apprentissage par projet : le point de vue de la recherche », *Technologie* 186 (2013): 46-55.

COMMENT ENSEIGNER LES ENJEUX SOCIO-ÉCOLOGIQUES ?

Issus de l'éducation populaire, de nombreux ateliers permettent de **construire un savoir collectivement et de le mettre en débat, tout en s'appuyant sur l'interdisciplinarité. Ils permettent la rencontre entre les savoirs académiques, expérientiels, populaires, etc.** Et s'inscrivent dans **un objectif d'émancipation individuel et collectif**. Ces ateliers peuvent être utilisés :

- ▶ **Dans les enseignements** afin de construire et mettre en débat un savoir.
- ▶ **Dans le cadre des réflexions menées sur les formations** afin de construire collectivement les stratégies et leur mise en œuvre.
- ▶ **Dans le cas de formation** du corps enseignant et de la direction.

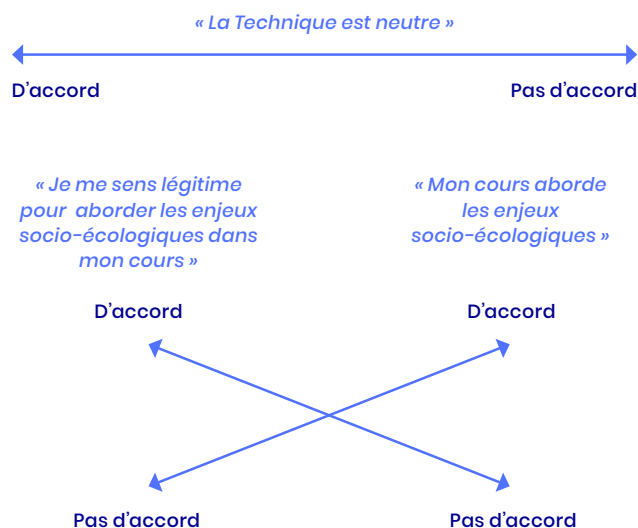
Le rôle d'animateur peut être endossé par chacune des parties prenantes. Quelques pistes :

L'ARPEPAGE permet de prendre connaissance collectivement d'un contenu. Par exemple dans le cas de l'arpentage d'un livre : dans un groupe, chaque personne se voit attribuer la lecture d'un chapitre. Dans un deuxième temps, chaque personne résume le chapitre qu'elle a lu à tous les autres. Ainsi, le contenu de l'ouvrage a été parcouru par tous et chacun peut rebondir et compléter le résumé des autres avec sa lecture et son expérience.

À l'INSA Lyon, l'arpentage a été utilisé **dans le cadre d'atelier de sensibilisation aux enjeux DDRS en vue de leur intégration dans les enseignements**. « Il est organisé autour des **4 grandes thématiques** retenues pour les enseignements DDRS : **changement climatique, énergie, ressources en matières premières, atteintes portées au vivant (écosystèmes) et santé humaine**. En tentant d'établir le **lien entre sciences, technique et société** et de mobiliser une **dynamique du changement à différentes échelles**. Les ressources proposées sont issues de la littérature et/ou du net. Elles n'ont pas été créées pour l'occasion. À l'issue de chaque grande thématique abordée (sur une période de 3 semaines environ), un point d'étape sera réalisé en présence des « apprenants » inscrits à l'atelier (sous la forme de cafés pédagogiques au sein de chaque département par exemple). Cet atelier de sensibilisation sera suivi de formations spécifiques ciblées sur des points précis des nouveaux contenus et des pédagogies associées¹²¹. »

LES DÉBATS MOUVANT OU EN CROIX permettent d'échanger autour d'une phrase, souvent affirmative. Les individus se placent physiquement dans l'espace, sur une dimension ou sur deux dimensions (« d'accord » d'un côté, « pas d'accord » de l'autre). Ce positionnement physique a deux avantages : il permet de visualiser les positionnements et d'impliquer les participants qui vont pouvoir échanger des arguments tout en se déplaçant dans l'espace s'ils changent d'avis.

The Shift Project a organisé une série d'atelier **« Quelles techniques pour l'ingénieur ? »** qui réunissait des enseignants-chercheurs et responsables de formation de **spécialités communes** (génie civil, numérique) mais d'écoles différentes. Voici un exemple des débats mouvants qui ont pu être réalisés, permettant à chacun d'exprimer son ressenti, ses certitudes et ses doutes quant à son rapport à la technique, aux enjeux et à l'enseignement de ces derniers.



D'autres pistes à explorer : tempête d'idée, débat boule de neige, la triple histoire, le théâtre d'improvisation, etc.

Quelques exemples d'application de ces outils

Ces pratiques peuvent être combinées, voici donc quelques exemples des combinaisons possibles appliquées à l'enseignement des enjeux socio-écologiques.

L'EXEMPLE DE TOULOUSE TECH

À Toulouse Tech (consortium de 8 établissements d'enseignement supérieur, membres ou associés de l'Université de Toulouse), des enseignants des écoles d'ingénieurs se sont réunis d'avril à octobre 2021 pour proposer des enseignements en lien avec les enjeux socio-écologiques. Quatre blocs d'enseignement ont été identifiés : 1/ Comprendre notre monde 2/ Gérer l'éco-anxiété 3/ Comprendre la dimension humaine et le rôle de l'ingénieur 4/ Imaginer un monde soutenable. C'est une base de réflexion qui détaille un contenu, des approches pédagogiques ainsi que de ressources possibles.

Par exemple, le bloc 1 propose de comprendre notre monde à travers des limites physiques, notamment en analysant les enjeux autour de l'énergie. Le tout, avec une approche interdisciplinaire : analyse socio-historique, physique, chimique, biologique, technique et économique. Voici quelques activités et formats pédagogiques proposés dans le cadre de ce travail.

¹²¹. Document interne à l'INSA Lyon, « Formation 0 : Sensibilisation aux enjeux DDRS en vue de leur intégration dans les enseignements », 2020

« Les formats pédagogiques pour aborder ces notions sont extrêmement divers, et peuvent accompagner une simple sensibilisation ou une formation de niveau pointu. Une activité telle que la Fresque du Climat et ses dérivés (fresque de la biodiversité, de l'aéronautique, etc) **permet de sensibiliser, mais ne saurait en aucun cas être suffisante pour les ingénieurs de nos écoles**. Les thématiques abordées dans cette brique se prêtent relativement bien à des cours magistraux, mais peuvent également être abordées par des pédagogies actives.

Certaines thématiques peuvent être abordées en utilisant les rapports du GIEC comme base. Plus généralement, **des pédagogies basées sur la lecture de livres** peuvent être mises en place. **Des cycles de conférences ou de films/débats** peuvent également être organisés (par les élèves par exemple).

Les thématiques complexes peuvent être abordées par des **études de cas** : l'impact de la pollution sur l'activité industrielle (fermeture d'usines en Chine pour cause de pollution atmosphérique); des exemples de migration climatique (certaines îles, littoraux); exemples de polluants (durée de vie des plastiques ou de la Chlordécone).

Il peut également être laissé **la liberté aux étudiant.es de travailler en groupes sur des problématiques de leur choix**, en lien avec les différentes limites planétaires. Des rendus sous formes de sessions posters ou d'exposés sont alors possibles¹²². »

COMMENT AVOIR DE L'IMPACT QUAND ON ENSEIGNE LES ENJEUX SOCIO-ÉCOLOGIQUES ?

Le retour d'expérience d'Arthur Keller



« Enseigner ne se résume pas à une transmission de savoir. Il faut accompagner le passage à l'action ! »

Arthur Keller est spécialiste des limites et vulnérabilités des sociétés modernes, des risques systémiques et des stratégies de résilience collective. Ingénieur de formation, il forme des élus à la résilience territoriale, enseigne à des auteurs l'usage des récits comme leviers de changement, et intervient comme enseignant dans plusieurs grandes écoles d'ingénieurs. Son audition est disponible sur la chaîne YouTube The Shift Project¹²³.

Les éléments qui suivent sont issus de cette audition.

Le discours d'un enseignant peut **inspirer**, c'est-à-dire donner envie ; **et mobiliser**, c'est-à-dire donner des leviers concrets pour être acteurs des changements nécessaires face aux enjeux socio-écologiques. Pour ce faire, l'enseignant doit capter puis retenir l'attention des étudiants.

► Comment capter l'attention des étudiants ?

L'un des moyens est de **faire le lien entre le vécu des étudiants et la thématique traitée** dans le cours en stimulant leur intérêt avant leur intellect. Pour cela, il est possible de commencer par **comprendre les étudiants** en parlant d'eux, de leur parcours, de leur motivation à suivre le cours ou non, de leur rapport à la thématique, etc. Cela peut se faire pendant le cours ou pendant des moments informels.

► Comment retenir l'attention des étudiants ?

Le **storytelling** permet de retenir l'attention des étudiants. Il permet également de **mobiliser stratégiquement des émotions** grâce à des rebondissements (inversions de valeur : passer du négatif au positif) et des ruptures de rythmes. Le storytelling peut consister en une **projection dans l'avenir**. Le type de récit le plus pertinent à utiliser en école d'ingénieur est probablement le **récit d'anticipation** (décrire un avenir réaliste et lucide, inspirant, positif ou non). D'autres types de récits peuvent être mobilisés (récit fictionnel et récit politique ou spirituel, mythique) mais peuvent être moins puissants.

► Mettre en œuvre ces approches grâce à la technique de la « secousse-rescousse » :

1. **Proposer un scénario crédible négatif** en s'appuyant sur les connaissances scientifiques. Appliqué au système-Terre et aux changements climatiques, ce peut être une description des conséquences sociales, techniques et économiques de l'inaction générale face aux enjeux climatiques. Prendre les scénarios pessimistes du GIEC par exemple ;
2. **Arriver à un consensus avec les élèves sur la plausibilité du scénario** en posant questions aux élèves pour identifier ce qu'ils ont compris et les potentiels points de blocage ;
3. **Imaginez que ce scénario se produise** en utilisant le présent comme temps de narration ;
4. Demander à chacun de répondre individuellement et collectivement la question : **comment êtes-vous impactés et comment réagissez-vous ?** notamment en exprimant son ressenti ;
5. **Imaginer collectivement un scénario alternatif plus souhaitable** ou en proposer un ;
6. Demander à chacun de se projeter dans ce nouveau scénario puis de répondre à la question : **si vous saviez faire ceci, seriez-vous mieux armés ? Comment vous sentiriez-vous ?**
7. **Faire le lien avec le cours** : son objectif est notamment de donner des leviers d'action pour agir dans le contexte de l'Anthropocène ;
8. Enfin, **engager moralement les étudiants vers un changement concret** : qui pense pouvoir faire quelque chose ? qui s'engage à le faire ?

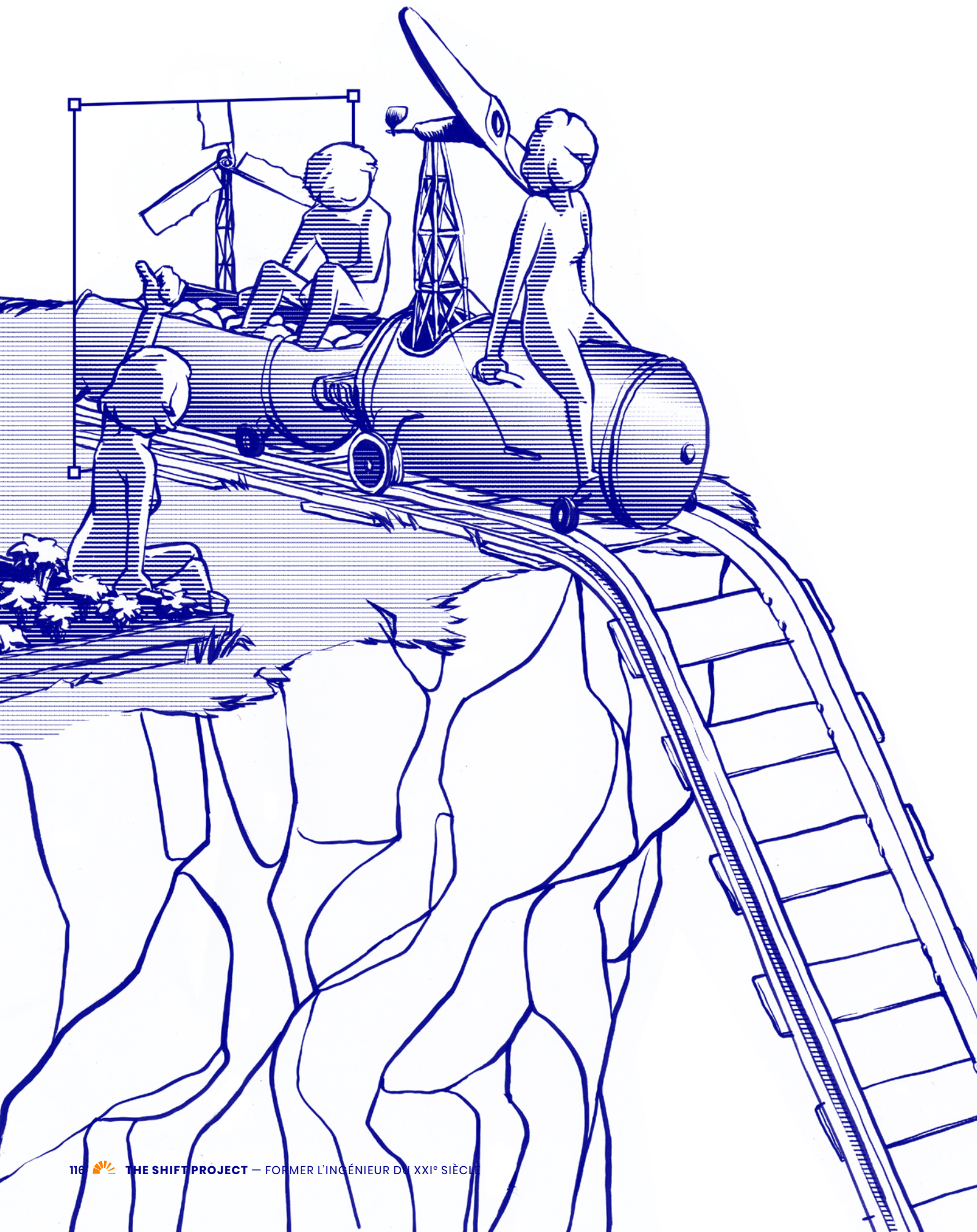
¹²². Document interne : synthèse des ateliers Toulouse Tech

¹²³. Audition d'Arthur Keller par The Shift Project, Audition #13 - Enseigner les défis du XXIe siècle et les enjeux d'une transformation collective, disponible en ligne

COMMENT ENSEIGNER LES ENJEUX SOCIO-ÉCOLOGIQUES ?



Photo : © INSA Toulouse



Comment élaborer un programme sur la durée de la formation ?

COMMENT structurer l'enseignement autour des enjeux socio-écologiques ? Si les parties précédentes ont proposé des pistes de contenu, d'horaires, de format et d'approches pédagogiques, il s'agit désormais d'interroger le positionnement et l'articulation des différents moments durant les années de la formation. Comment enseigner ces notions de manière cohérente et interdisciplinaire tout au long de la formation ? À quel moment de la formation aborder chacun des enjeux ? Comment articuler enseignements dédiés et non dédiés ? Et enfin, sous quel format peuvent-ils être abordés (projet, cours, ateliers...) ?

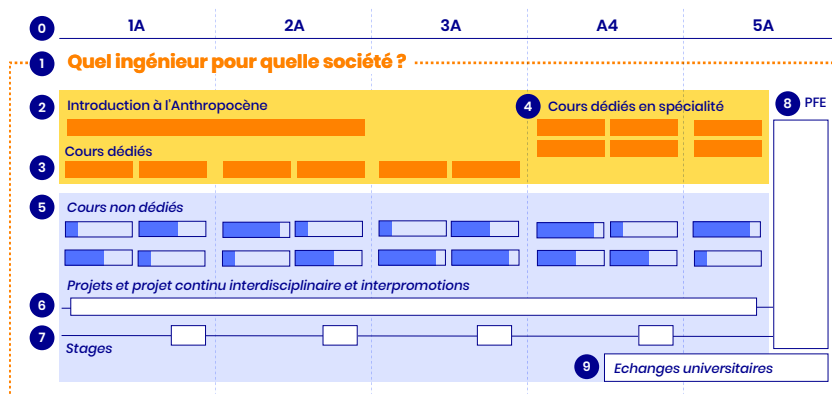
Quelques grands éléments de réponse sont formulés ci-après. Ils constituent **une proposition globale de programme pédagogique sur 3 ou 5 années de formation**. Le contenu et le format des éléments inscrits sur ce programme ne sont pas détaillés car nous pensons que c'est aux équipes pédagogiques qu'il revient de les définir.

Une proposition de contenus indispensable pour l'ingénieur et une proposition d'approche pédagogique ont été détaillés précédemment.

Un tel programme a tout intérêt à être élaboré avec les directions de département, les enseignants et des étudiants, en vue de répondre à un objectif de cohérence, aux attentes et aux difficultés de chacun (plus d'éléments à ce sujet sont abordés dans le *Guide méthodologique*).

Comment structurer l'enseignement autour des enjeux socio-écologiques ? Il s'agit désormais d'interroger le positionnement et l'articulation des différents moments durant les années de la formation. À quel moment de la formation aborder chacun des enjeux ? Comment articuler enseignements dédiés et non dédiés ? Et enfin, sous quels formats peuvent-ils être abordés (projet, cours, ateliers...) ? Quelques grands éléments de réponse sont formulés ci-après. **Ils constituent une proposition globale de programme pédagogique sur 3 ou 5 années de formation.**

Formation en 5 ans



Les formations en 5 ans permettent d'élaborer sur un temps relativement long des constats rigoureux des enjeux socio-écologiques, le développement des compétences adaptées et des propositions de modes d'actions adéquats pour les futurs ingénieurs. Par ailleurs, elles offrent une bonne marge de manœuvre à celles et ceux qui les pensent (volumes horaires, orientations des projets, etc.).

0 Prendre le temps pour prendre du recul sur sa formation et construire son parcours professionnel avec lucidité. Le rythme effréné des années préparatoires, de la formation puis de l'activité professionnelle enjoint peu à l'analyse de son propre parcours. Des changements de rythmes dans la formation et des réflexions personnelles et collectives permettent un meilleur contrôle de notre temps.

1 « Quels ingénieurs devenir, pour contribuer à quelles sociétés ? » Questionner le rôle de l'ingénieur est fondamental et peut constituer un fil rouge tout au long de la formation.

Collectivement, des moments dédiés permettent d'identifier clairement les responsabilités et les leviers à disposition de l'ingénieur, qu'ils soient techniques ou non. Individuellement, cela permet d'évacuer de nombreuses situations de stress, d'éco-anxiété ou de dépression, et que chaque étudiant puisse progressivement se construire une vision de son parcours professionnel de manière lucide et en la confrontant au collectif d'étudiants et d'enseignants. Ces questionnements et productions peuvent faire l'objet de cours dédiés (épistémologie, histoire, philosophie, etc.) et se répartir dans l'ensemble des cours existants.

2 Une introduction à l'Anthropocène en tronc commun est un moyen d'assurer à tous les élèves une base interdisciplinaire de compréhension des enjeux. Ce concept englobant permet d'alimenter le fil rouge et peut être décliné à l'envie dans les différents enseignements tout au long de la formation.

- Voir l'« école de l'Anthropocène » organisée par l'école urbaine de Lyon
- Voir le tronc commun « Introduction à l'Anthropocène » mis en place à l'INSA Lyon (cf Retour d'expérience).

3 Des cours dédiés aux enjeux socio-écologiques sont parfois nécessaires, notamment pour prendre le temps d'en faire un tour d'horizon suffisamment complet et de les aborder selon des bases scientifiques. Pour nombre d'entre eux, l'approche pédagogique peut être « innovante » à cause de leur caractère transversal et lorsque les savoirs sont encore peu stabilisés et enseignés en formation d'ingénieur. Nombre de ces cours peuvent provoquer de l'anxiété ou le sentiment d'impuissance ; la posture active des étudiants est donc à favoriser ainsi que le travail sur de possibles et souhaitables réponses, dans ces enseignements et les suivants, et notamment en spécialité.

- Dans le réseau Toulouse Tech, un collectif d'enseignants a formulé des propositions de blocs d'enseignements interdisciplinaires dédiés aux enjeux : 1/ Comprendre notre monde (enjeux, mécanismes, unités de mesure et limites) 2/ Gérer l'éco-anxiété 3/ Comprendre la dimension humaine et le rôle de l'ingénieur 4/ Imaginer un monde soutenable (technologies, récits, gouvernances, paradigmes)
- Voir le référentiel de connaissances proposé par The Shift Project (cf Manifeste).

4 Des cours dédiés aux enjeux socio-écologiques dans les départements de spécialité s'avèrent nécessaires dans chaque spécialité, notamment pour enseigner de nouvelles techniques d'ingénieurs comme l'ACV ou l'écoconception appliquées à un secteur en particulier, la phytoépuration, les principes low tech...

5 Au-delà des cours dédiés, une grande partie des changements réside dans l'intégration des enjeux socio-écologiques dans des cours existants.

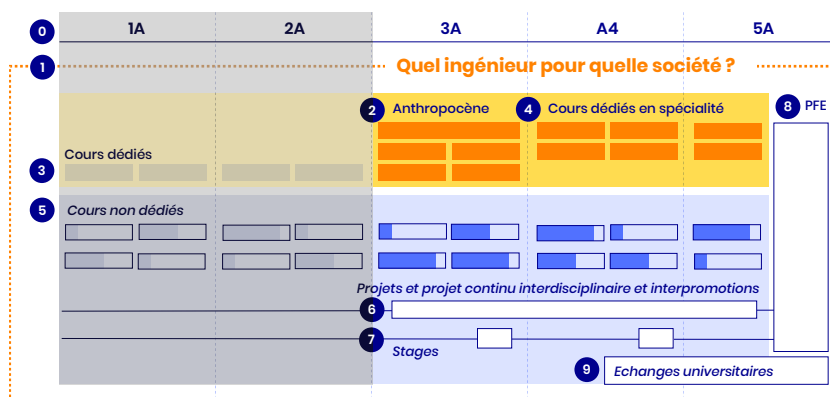
Chaque cours peut les aborder à des degrés différents. Certains cours, comme les sciences fondamentales, peuvent aborder ces enjeux grâce à des exemples illustratifs ou à des prises de recul épistémologiques, historiques ou éthiques. D'autres, comme ceux des sciences de l'ingénieur, peuvent intégrer pleinement ces enjeux avec les techniques d'évaluation des impacts (ACV, indicateurs biodiversité), et de conception (écoconception, objectifs de durabilité, matériaux biosourcés, etc.). Enfin, c'est l'occasion de développer de nouveaux savoirs (recherche en matériaux bas carbone, techniques de dépollution...).

- ▶ Illustrer des équations mathématiques avec les impacts sociaux, écologiques et économiques de pêcheries grâce au modèle proie-prédateur. Voir les travaux du groupe de travail mathématique (cf Retour d'expérience).
- ▶ Utiliser les principes low tech dans des projets de mécatronique. Voir les projets encadrés par Romain Colon à l'INSA Lyon.
- ▶ Définir des protocoles de renoncement permettant d'arbitrer sur la viabilité d'une technique au regard des enjeux. Voir les recherches d'Origens Media Lab.

6 Les projets, dédiés ou non, peuvent être sélectionnés et évalués par l'établissement et les étudiants selon des critères relatifs aux enjeux socio-écologiques. Ils sont l'occasion de réduire la distinction sachant/non-sachant, de construire collectivement un savoir relatif aux enjeux et de développer des compétences concrètes en se confrontant au réel et au collectif.

- ▶ Étudier une controverse sociotechnique et/ou écologique en temps réel. Voir les cartographies de controverse aux Mines ParisTech.

Formation en 3 ans



Les formations en 3 ans n'ont pas de prise sur les 2 premières années de classes préparatoires, ce qui réduit drastiquement le champ d'action. Les éléments hachurés en gris indiquent qu'il serait souhaitable que les classes préparatoires intègrent les enjeux socio-écologiques afin de fournir une continuité d'enseignement entre le bac réformé et les formations d'ingénieur d'une part, et de bien enseigner les bases scientifiques des enjeux concernés aux étudiants d'autre part.

- ▶ Mener un projet en suivant des protocoles d'enquête, de conception, d'évaluation et de décision prenant en compte les enjeux socio-écologiques (cf Manifeste).

Des projets continus réels, sur l'ensemble de la formation et inter-promotions peuvent permettre de traiter en profondeur une thématique complexe en combinant chacune des spécialités de l'établissement.

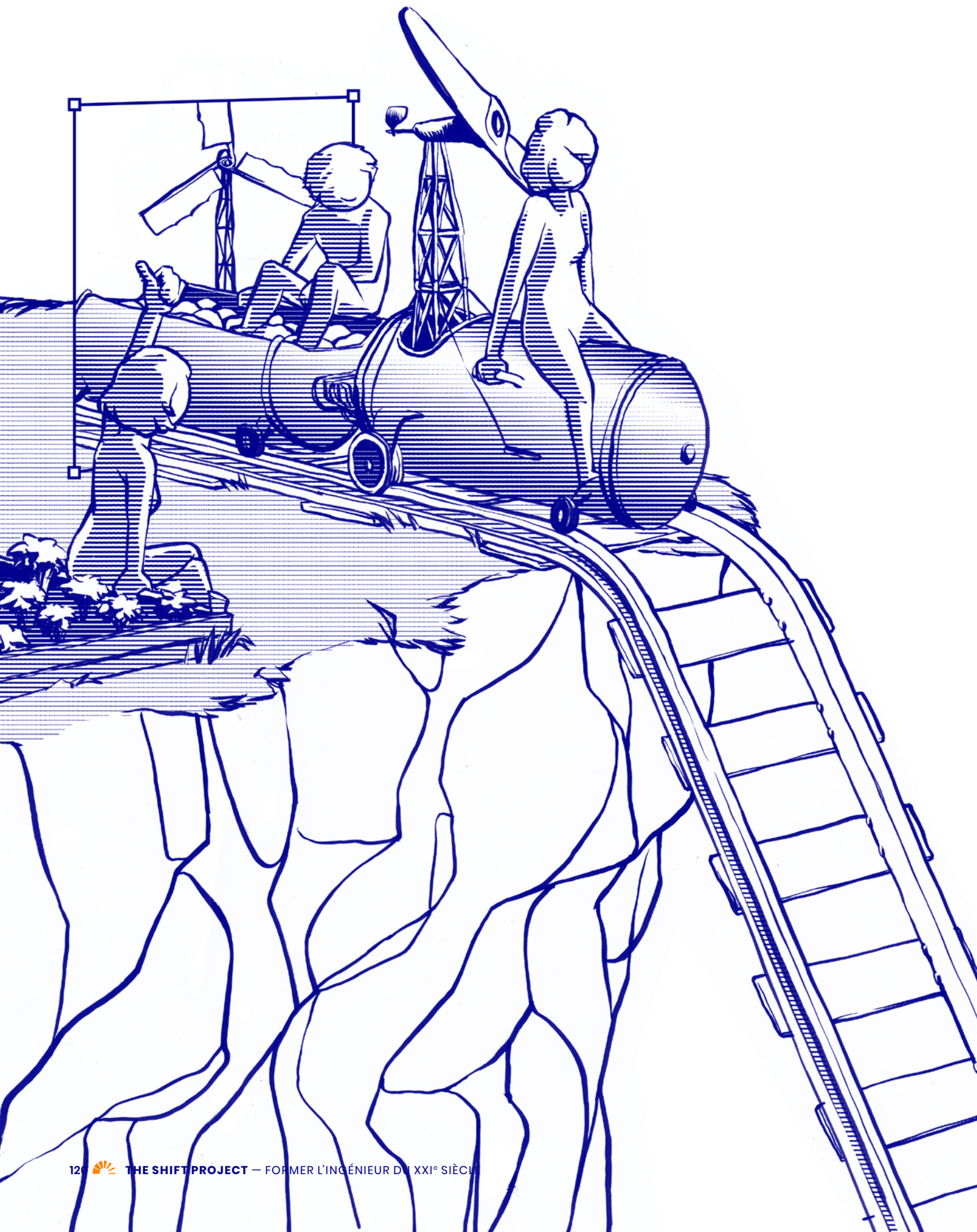
- ▶ Comment mettre le numérique au service de la transition en le rendant compatible avec les contraintes physiques et la structure sociale ?
- ▶ Utiliser son campus ou sa résidence universitaire comme laboratoire d'expérimentation (fab lab, études et expérimentations sur son campus, etc.)

7 8 Les stages en entreprises, ou en collectivité et surtout le PFE, peuvent être sélectionnés et évalués par l'établissement et les étudiants selon des critères relatifs aux enjeux socio-écologiques. Demander un développement des enjeux socio-écologiques dans les rapports de stages et les évaluations orales.

- ▶ Développer des partenariats avec des structures qui proposent des stages s'attachant à ces critères (forum des entreprises SE, lien avec les alumnis, etc.)
- ▶ Constituer une base de données des PFE en lien avec les enjeux socio-écologiques

9 Proposer des partenariats universitaires prenant en compte les enjeux socio-écologiques, par exemple pour des projets interdisciplinaires. Les césures peuvent être encouragées pour permettre aux étudiants de prendre du recul.

- ▶ Valoriser les partenariats qui proposent des formations relatives aux enjeux SE.
- ▶ Développer des partenariats avec des formations très différentes de la sienne afin de permettre aux enseignants des échanges avec des collègues d'autres horizons (voire même des interventions croisées ponctuelles dans les enseignements) et de faire travailler différents étudiants sur des projets aux enjeux transversaux.
- ▶ Mettre en place un quota carbone pour le déplacement des élèves à l'étranger afin de soulever des questions relatives aux émissions et à son empreinte individuelle.



Pour finir

LE CONTEXTE INÉDIT de la crise anthropocénique nous invite à **repenser le rôle des ingénieurs comme animateurs du lien entre technique et société**. Les connaissances scientifiques et techniques alliées aux compétences reconnues des ingénieurs, comme la capacité de conceptualisation et le travail en interdisciplinarité, légitiment déjà ce rôle. Disposer de connaissances sur les enjeux socio-écologiques – en sciences de la nature et en sciences humaines et sociales, et développer des compétences adaptées comme l'approche systémique ou l'agir responsable est nécessaire pour leur permettre d'endosser un tel rôle.

Ces compétences sont indispensables afin de leur permettre d'évaluer systématiquement les impacts sociaux et écologiques des activités humaines. La formation à des techniques sobres énergétiquement et matériellement parlant et favorisant les bonnes conditions de travail et d'usage doit constituer une boîte à outils à déployer rapidement en entreprise.

Intégrer ces connaissances et compétences dans les cursus ne peut se faire sans remettre en question les approches pédagogiques et la cohérence des enseignements. Le déploiement d'approches pédagogiques actives doit permettre de répondre au caractère encore peu stable de ces savoirs et aux difficultés pour les enseignants d'intégrer de nouvelles notions en peu de temps. Des cours dédiés sont probablement nécessaires mais la majorité des enjeux socio-écologiques peuvent être intégrés dans les cours existants et dans les projets et stages. Cela allège les remaniements à opérer et permet de ne pas écarter les enseignants en place.

Pour les enseignants et les directions, le défi est important mais est aussi l'occasion de répondre à une demande sociétale, des étudiants, des enseignants et des entreprises. On ne peut forcer un enseignant à changer une aspiration de son cœur. **Il revient donc bien à chaque enseignant, à chaque établissement, de faire son propre examen de conscience, de comprendre sur quelles valeurs reposent ses décisions, et de décider des transformations à engager.** Pour les directions, toute action trop normative risque d'engendrer frustration, culpabilité ou refus d'agir. Il s'agit donc de travailler en co-construction et de bien saisir quel est le moteur de l'action de chacun, le désir de contribuer à bâtir une société résiliente par exemple.

Annexes

1 — La résilience

Depuis les années 1980, le terme de résilience est utilisé dans de nombreux domaines, à la fois à l'échelle individuelle, lorsqu'il est utilisé en psychologie par exemple ; et à l'échelle collective, lorsqu'il est utilisé pour décrire des systèmes (société, écosystème, économique...). des pratiques managériales ou utilisé comme concept politique. Dans les deux cas, la résilience ne peut pas désigner un simple « retour à l'équilibre ».

Comment faire alors pour pratiquer une ingénierie de la résilience ? Et qu'est-ce que cela signifie ?

Au niveau individuel, l'ingénieur peut appliquer le concept à soi ou aux autres. Appliqué à soi, l'ingénieur dans l'Anthropocène est vulnérable en ce qu'il a conscience des limites planétaires, que le dépassement de certaines de ces limites est inéluctable et que sa seule action individuelle ne sera jamais suffisante. Cela peut provoquer un stress pré-traumatique appelé **solastalgie ou éco-anxiété** (tristesse, anxiété, insomnie, anorexie, dépression, sensation d'être démuné...). L'ingénieur doit-il pour autant être résilient ? Seulement si la résilience individuelle est entendue comme la capacité d'un individu à **non seulement absorber un choc mais aussi à en comprendre les causes structurelles**. Il s'agira donc d'une part de participer activement à l'adaptation et à l'anticipation nécessaires face aux chocs, d'autre part d'agir sur les causes structurelles de ces chocs, sans oublier de s'adapter lui-même afin de préserver sa santé physique et psychique. La résilience individuelle de l'ingénieur doit donc lui permettre d'utiliser sa compréhension des causes de la solastalgie qui le touche ou le menace afin de réduire ses effets. L'ingénieur, qu'il utilise le concept en l'appliquant à d'autres individus (victimes de catastrophes, d'accidents industriels, etc.) ou à lui-même, doit être conscient des limites de la résilience et veiller à les prendre en compte. Sinon, il encourt notamment le risque de sur-responsabiliser l'individu, ce qui a pour conséquence de pointer celles et ceux qui ne peuvent pas s'adapter (qui sont souvent les plus pauvres et donc les plus vulnérables et les premiers touchés). De plus cela peut déresponsabiliser les structures bien plus en mesure d'agir (Système économique, managérial, etc.), en soutenant que c'est l'individu qui doit absorber le choc puis s'adapter afin d'être socialement accepté. L'ingénieur est souvent amené à diriger des équipes (« ingénieur-manager »). L'usage de la résilience dans ce cadre doit faire l'objet de la plus grande prudence car elle « est indissociable du management en régime néo-libéral. La résilience est alors l'autre nom de la flexibilité et de la résignation. [...] Les salariés résilients correspondent au portrait-robot de l'employé idéal. [...] La flexibilité du résilient est la contrepartie de son impuissance politique¹²⁴. »

Pour tenir compte de ces critiques, « l'analyse de la responsabilité en termes relationnels permet de replacer au

cœur de l'analyse la question du pouvoir — des inégalités de pouvoir —, et celle des asymétries de responsabilités. Dès lors que l'action individuelle (l'acteur individuel ou collectif) cesse d'être le point d'ancrage de l'analyse, il devient possible de reconsidérer ces questions comme inhérentes aux tensions et dynamiques des relations multiples dans lesquelles les parties sont inscrites et non, par exemple, comme une faute morale imputable à un acteur justiciable de blâmes ou de sanctions, ce qui est le cas lorsque la responsabilité est pensée à l'aide d'un modèle juridique de la responsabilité¹²⁵. »

Au niveau collectif, appliquée à la société ou aux territoires, la résilience désigne ici « une société capable d'absorber les perturbations en se réorganisant ou en modifiant sa structure, tout en conservant ses fonctions essentielles, sa cohésion et ses capacités de gouvernance. » Et de même que pour l'individu, elle doit permettre de s'attaquer aux causes structurelles des perturbations : « une transformation profonde des structures sociales, économiques et physiques des systèmes territoriaux est inhérente à la résilience telle que développée dans [le cadre des territoires]¹²⁶. » Il convient de prendre note de certaines critiques formulées à l'égard de la « résilience collective » lorsqu'elle désigne uniquement un « retour à l'équilibre ». Premièrement, il est possible qu'elle soit interprétée de différentes manières : là où certains y voient un retour en arrière, d'autres l'envisagent comme un renouvellement¹²⁷. Elle n'est ni l'un, ni l'autre, elle n'est jamais acquise et totale car elle varie selon les contextes et reste en constante évolution¹²⁸. Deuxièmement, bien que les composants d'un système soient résilients, cela n'implique pas que le système lui-même soit résilient¹²⁹. Enfin, elle peut constituer une réponse marchande à la crise écologique (géo-ingénierie par exemple). Attirons également l'attention sur le risque d'actions contre-productives au nom de la résilience : si la résilience, d'un territoire par exemple, n'est entendue que comme l'adaptation face aux risques, celui-ci pourrait construire des infrastructures très imposantes pour se protéger des crues ou inondations, doubler tous ses réseaux afin d'éviter les coupures de service, construire de grands entrepôts de stockage de denrées considérées comme indispensables, etc. et pourrait par une certaine démesure accélérer les émissions de GES et l'artificialisation des sols, à l'origine des catastrophes dont il souhaite se prémunir.

124. Gefen, « Résilience, vous avez dit résilience ? »

125. Sandra Laugier, « Care, environnement et éthique globale », Cahiers du Genre n° 59, no 2 (24 novembre 2015) : 127-52.

126. Cerema, « La boussole de la résilience. Repères pour la résilience territoriale. »

127. Magali Reghezza-Zitt, Résilience, adaptation et vulnérabilité aux changements globaux, UVED, 26 septembre 2018.

128. Michel Manciaux, « La résilience », Etudes Tome 395, no 10 (2001) : 321-30.

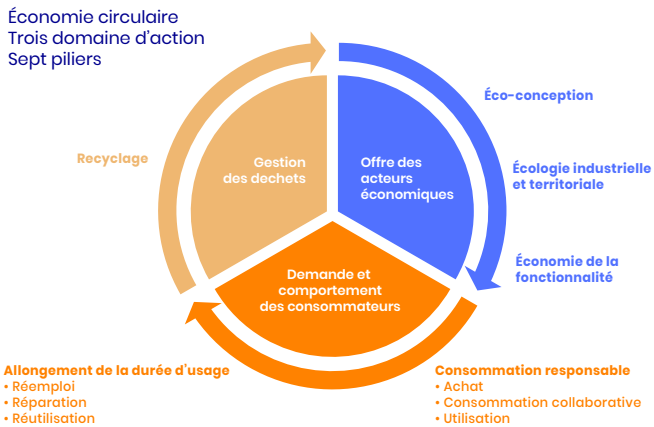
129. Reghezza-Zitt, Résilience, adaptation et vulnérabilité aux changements globaux.

En s'appuyant sur les principes identifiés par le Cerema pour caractériser la résilience d'un territoire (« 1/ anticiper tout type de perturbation ; 2/ agir pour en atténuer les effets ou en éviter l'apparition ; 3/ rebondir, récupérer ; 4/ s'adapter et se transformer¹³⁰ ») ainsi que sur les autres travaux cités précédemment, voici une proposition des principes à suivre pour une ingénierie de la résilience :

	1 — Anticiper tout type de perturbation	2 — Agir pour en atténuer les effets ou en éviter l'apparition	3 — Rebondir, récupérer suite à une perturbation	4 — S'adapter et se transformer
Echelle collective	▶ en entreprise : intégrer les conséquences du changement climatique dans les analyses de risques	▶ une ingénierie très sobre en émission de GES ▶ une ingénierie intégrant dans sa conception les risques du changement climatique et de ses effets domino : un bâtiment en zone affectée par les canicules peut être conçu pour favoriser la circulation d'air frais, être bien isolé et bien orienté et protégé des rayonnements pour éviter l'utilisation de climatisation, par ailleurs vulnérable en cas de	▶ une ingénierie réparatrice du vivant : comment restaurer les écosystèmes d'une résidence péri-urbaine après une catastrophe naturelle ▶ disposer d'un système technique performant pour rétablir rapidement des services essentiels, comme le bon fonctionnement ou l'accès aux hôpitaux	▶ À inclure dans l'analyse de risques comme cela est déjà censé se faire mais en élargissant le scope des perturbations afin que l'ingénierie agisse dès maintenant sur les causes causant les chocs, notamment sur les émissions de GES et la destruction de la biodiversité (rejoint le point 1)
Echelle individuelle	▶ À construire par chaque individu pour sa sphère personnelle et professionnelle	▶ À construire par chaque individu pour sa sphère personnelle et professionnelle	▶ À construire par chaque individu pour sa sphère personnelle et professionnelle	▶ À construire par chaque individu pour sa sphère personnelle et professionnelle

130. Cerema, « La boussole de la résilience. Repères pour la résilience territoriale. »

2 — L'économie circulaire



Source : ADEME, 2021

Les principaux domaines d'action de l'économie circulaire selon l'ADEME¹³¹

- ▶ **L'approvisionnement durable.** Il concerne le mode d'exploitation/extraction des ressources visant une exploitation efficace des ressources en limitant les rebuts d'exploitation et en limitant l'impact sur l'environnement, notamment dans l'exploitation des matières énergétiques et minérales (mines et carrières) ou dans l'exploitation agricole et forestière tant pour les matières/énergies renouvelables que non renouvelables.
- ▶ **L'écoconception** vise, dès la conception d'un procédé, d'un bien ou d'un service, à prendre en compte l'ensemble du cycle de vie en minimisant les impacts environnementaux.
- ▶ **L'écologie industrielle et territoriale**, dénommée aussi symbiose industrielle, constitue un mode d'organisation interentreprises par des échanges de flux ou une mutualisation de besoins.
- ▶ **L'économie de la fonctionnalité** privilégie l'usage à la possession et tend à vendre des services liés aux produits plutôt que les produits eux-mêmes.
- ▶ **La consommation responsable** doit conduire l'acheteur, qu'il soit acteur économique (privé ou public) ou citoyen consommateur, à effectuer son choix en prenant en compte les impacts environnementaux à toutes les étapes du cycle de vie du produit (biens ou service).
- ▶ **L'allongement de la durée d'usage** par le consommateur conduit au recours à la réparation, à la vente ou don d'occasion, ou à l'achat d'occasion dans le cadre du réemploi ou de la réutilisation.
- ▶ **Le recyclage** vise à utiliser les matières premières issues de déchets.

131. « L'économie circulaire », ADEME, consulté le 8 octobre 2021.

132. Lewis Mumford, *Technique et civilisation*, 1950.

133. « Quels choix technologiques pour une société durable ? », Revue des Centraliens Hors-série (2016); 54; La Fabrique Ecologique, « Vers des technologies sobres et résilientes - Pourquoi et comment développer l'innovation "low-tech" ? »

134. François Jarrige, « Brèves remarques sur les choix technologiques dans l'Histoire », Quels choix technologiques pour une société durable ? Revue des Centraliens Hors-série (2016); 4.

3 — Les low-techs

« La réponse aux problèmes posés par la technique, on ne la trouvera pas dans la technique ni dans l'application de ces méthodes de pensée qui ont justement créé une disparité tellement ironique entre nos moyens physiques et nos fins sociales, entre la méthode scientifique et la discipline morale¹³². » Cette phrase écrite par Lewis Mumford en 1950 est toujours d'actualité, surtout dans le cas des ingénieurs qui se posent rarement la question de savoir si le projet qu'ils mènent ou le produit qu'ils inventent-conçoivent-produisent-vendent est compatible avec les enjeux de notre siècle. Répondre à un cahier des charges en ne respectant que des indicateurs financiers et techniques n'est plus possible dans le contexte actuel. L'ingénieur doit trouver une autre approche qui permet de combiner les savoirs et méthodes scientifiques, les savoirs et moyens techniques avec les besoins des sociétés, des territoires, des villes et des individus. Pour ce faire, il doit puiser dans les sciences humaines et sociales et prendre en compte des savoirs extra-académiques et extra-scientifiques.

Les **low-tech** nous semblent combiner ces différentes approches, sciences et méthodes, aujourd'hui essentielles à l'ingénieur. Dès « les années 1960-1970, beaucoup ont cherché à définir ce que seraient des technologies douces [...]. Il s'agissait d'imaginer des trajectoires techniques à petite échelle, décentralisées, sobres en énergie, respectueuses de l'environnement et à forte utilisation de main-d'œuvre. » D'une part, elles succèdent aux **technologies conviviales** (Ivan Illich), **appropriées** (Ernst Friedrich Schumacher), **autonomes** (André Gorz), **créoles** (David Edgerton), **libératrices** (Boochkin), **démocratiques** (Mumford), ou encore à la **critique du système technicien** (Jacques Ellul) et des **techniques hétéronomes** (André Gorz). Loin d'être une pratique de bricoleur amateur, les **low-tech** constituent probablement l'une des plus importantes pistes de réflexions et d'actions pour l'ingénieur¹³³.

D'autre part, les **low-tech** constituent une réponse au « tout high tech » mais « l'histoire des techniques devrait cesser d'être le récit linéaire de la victoire inéluctable des high tech sur les technologies anciennes pour penser plutôt la rivalité constante entre hautes et basses technologies, entre des technologies de la puissance fondées sur l'exploitation des ressources et la spécialisation des tâches et des technologies sobres et économes vers lesquelles devrait s'orienter la créativité des ingénieurs, malgré la pression des actionnaires et des pouvoirs publics¹³⁴. »

ALORS QUE SONT LES LOW-TECH ?

« Les **low-tech**, par opposition aux **high-tech**, sont une démarche visant, dans une optique de durabilité, à questionner nos besoins réels et développer des solutions aussi faiblement « technologisées » que possible, minimisant l'énergie requise à la production et à l'usage, utilisant le moins

possible de ressources / matériaux rares, n'infligeant pas de coûts cachés à la collectivité.

Elles sont basées sur des techniques les plus simples possible, les moins dépendantes possible des ressources non renouvelables, sur des produits réparables et maintenables dans la durée, facilitant l'économie circulaire, la réutilisation et le recyclage, s'appuyant sur les savoirs et le travail humain digne.

Cette démarche n'est pas seulement technologique, mais aussi systémique. Elle vise à remettre en cause les modèles économiques, organisationnels, sociaux, culturels. À ce titre, elle est plus large que l'écoconception¹³⁵.

Dans le rapport intitulé « *Vers des technologies sobres et résilientes – pourquoi et comment développer l'innovation low-tech ?* »¹³⁶ de La Fabrique écologique, les auteurs proposent de poser systématiquement trois questions simples (1-3), au travers desquelles se révèlent les « critères low-tech » (a-e), qui recoupent beaucoup avec les critères de l'économie circulaire par exemple et que nous nous proposons de synthétiser ci-dessous :

1 — Pourquoi produit-on ?

2 — Que produit-on ?

3 — Comment produit-on ?

1 — La première question peut sembler la plus évidente et pourtant, c'est probablement la moins posée de toute.

Pourquoi produit-on ? Une réponse honnête à cette question pourrait en amener plus d'un à démissionner, prenant en pleine face l'inconsistance de leur rôle dans la société, voire leur responsabilité quant à l'état du système. **Identifier le besoin (a)** est la première étape d'une production pertinente. Ce besoin doit être exprimé par les utilisateurs eux-mêmes et corrigé des biais marketing (publicité notamment). La réponse au besoin doit également prendre en compte le « **degré d'utilité** » (b), c'est-à-dire identifier à quel point le service rendu par le produit (objet ou service) vaut les dégâts environnementaux causés pour le produire et l'utiliser. (a) et (b) permettent de répondre à la question « *pourquoi produit-on ?* » : parce qu'on en a besoin et parce que c'est utile.

2 — Une fois la première question traitée, **l'ingénieur doit considérer un ensemble de caractéristiques essentielles à intégrer au cahier des charges** du système considéré (allant d'un ensemble de sous-produits qui composent le produit final à un système de management ou à une chaîne de production). Première condition, le système modélisé par l'ingénieur doit être :

- ▶ **conçu pour durer (c).** « *Simplicité technologique, robustesse, réparabilité, modularité, possibilité de réutilisation et réemploi, plans et technologie accessibles à tous, interopérabilité...* » Il faut mettre fin à l'obsolescence programmée des produits (casse, incompatibilité des mises à jour, etc.) et des méthodes de management (projets, burn out, bore out, etc.).
- ▶ **conçu afin de minimiser la consommation de matière première (d),** qu'elles soient « renouvelables ou non, rares ou non, produites dans des conditions environnementales et sociales « acceptables » ou non, selon le choix et les critères d'exploitation. »
- ▶ **conçu afin de minimiser la consommation d'énergie (e)** que ce soit à la fabrication (énergie grise) ou à l'usage.
- ▶ **conçu afin de maximiser les bonnes conditions de travail (f)** notamment dans le cas de l'extraction de ressources énergétiques et non-énergétiques.
- ▶ **conçu afin de minimiser les conséquences environnementales (g)** de tout type, notamment **naturelles** (destruction de la biosphère, des conditions d'habitabilité, etc.) et **sociales** (blocages technologiques, conditions matérielles de l'exercice d'un pouvoir, etc.).
- ▶ **conçu pour maximiser le « degré d'autonomie à l'usage » (h).** L'ingénieur doit porter une attention particulière à la dimension aliénante ou, au contraire, libératrice que porte le système (produit, méthode, etc.) qu'il modélise et produit. Ainsi, il doit préférer maximiser le degré « *de maîtrise locale, de simplicité, d'accessibilité au plus grand nombre, et donc de résilience, apporté par la solution.* »

3 — Une fois que le besoin a été identifié correctement et qu'une solution respectant les principes précédents a été modélisée, **l'ingénieur doit fixer les conditions de production qui doivent elles-aussi respecter les critères (c) à (h).** Particulièrement, l'ingénieur doit penser le lien au territoire dans lequel a émergé le besoin identifié. C'est-à-dire, penser une articulation avec les compétences locales (i. e. l'emploi), avec la résilience du territoire, avec l'économie circulaire, etc.

Sur l'ensemble du processus (1-3), **l'ingénieur doit éviter quelques écueils :**

- ▶ **Penser uniquement en termes d' « innovation »**, de « solution innovante », de « solution créative » et d'abord penser à l'existant, aux savoirs et savoir-faire locaux.
- ▶ **Penser uniquement low-tech ou uniquement high-tech.** C'est bien la complémentarité entre ces deux approches qui permet des réponses cohérentes avec des problématiques actuelles.

¹³⁵. La Fabrique Ecologique, « *Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment développer l'innovation "low-tech" ?* »

¹³⁶. La Fabrique Ecologique.

CONCLUSION

4 — Proposition de calendrier d'intégration des techniques souhaitables

Ces tableaux ont été construits grâce à des ateliers impliquant différentes parties prenantes d'établissements INSA et des experts du Shift Project.



Source A : Martine Meireles-Masbernat, Laurent Nicolas, et Abdelilah Slaoui, *Inventer l'avenir : l'ingénierie se met au vert*, CNRS Editions, 2019.

INTÉGRATION DE PRINCIPES ET TECHNIQUES DANS LES ENSEIGNEMENTS DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION

TRÈS COURT TERME : 0-1 AN

COURT TERME : 0-3 ANS

MOYEN TERME : 1-5 ANS

LONG TERME

INGÉNIERIES À MASSIFIER ET À DÉVELOPPER

INGÉNIERIES COMPATIBLES
avec les enjeux socio-écologiques



Ecoconception & économie circulaire

- Diagnostic ressources pour identifier les gisements de matériaux valorisables lors d'une déconstruction

Biomimétique Transferts de modèles

- Matériaux performants inspirés du vivant (structure)
- Lames de bio-composite reproduisant les mouvements de la pomme de pin pour l'aération automatique en fonction de la température extérieure B

Basses technologies (low tech)

- Mutualisation énergétique entre bâtiments de destinations variées (PAC)
- Bon matériau au bon endroit : diversité de matériaux notamment moins carbonés
- Bâtiment sans systèmes (de chauffage, régulation)

Biomimétisme

Architecture / fonctions bio-inspirées au niveau du bâtiment (régulation thermique, structure)

Résilience et techniques conviviales

Concevoir évolutif (changement de destination des pièces ou faciliter des réaménagements) A

Biomimétisme biosourcé

batiment intégré à son environnement et assurant plusieurs fonctions : dépollution des eaux, air, Végétalisation des toitures (isolation, gestion des pluies...), mutualisation des usages (logements, bureaux, crèches, sport...)

Vers l'ingénierie de la permanence

- Approche interdisciplinaire
- Questionne les besoins, maximise la durabilité, la réparabilité, la mutualisation, la recyclabilité et l'autonomie à l'usage,
- Permet une restauration ou une reconversion des systèmes nocifs
- Suit une gouvernance collective des communs.
- Doit respecter les besoins des écosystèmes, et peut en appliquer ses principes avec des matériaux biosourcés et sans surexploitation.
- Vise à réconcilier les humains avec le reste du vivant

INGÉNIERIES À CONTINUER ET À FAIRE MUTER

Ingénieries high-tech

- Matériaux ultra performants (aerogels) pour la rénovation des bâtiments (isolation d'appartements avec une faible épaisseur)
- Simulation thermique et capteurs pour l'optimisation de grands bâtiments, IA pour l'optimisation des structures, migration d'humidité avec les matériaux biosourcés...
- Construction hors site pour favoriser l'utilisation de matériaux biosourcés (bois...)

Ingénieries de la fermeture

Techniques de renoncement

Protocoles de renoncement aux imaginaires de bâtiments symboles valorisant la puissance humaine : porte à faux importants, structures ultra complexes

Techniques de reconversion

- Techniques de rénovation et maîtrise d'œuvre
- Techniques de changement de destination des bâtiments pour réemployer le bâtiment

Techniques de démantèlement

Fin de vie des bâtiments : méthodes à adapter pour passer de la démolition à la déconstruction pour réemploi des matériaux

Sources - A : Patrick Rubin, Annie Le Bot, Clément Vulliez et Hugo Dessis, *Canal architecture, Zones en déshérence / en devenir*, 2021
B : Martine Meireles-Masbernard, Laurent Nicolas, et Abdellilah Slaoui, *Inventer l'avenir : l'ingénierie se met au vert*, CNRS Editions, 2019.

Comité de rédaction & remerc

COMITÉ DE RÉDACTION

Auteurs



Damien Amichaud,
The Shift Project, chef de projet



Sam Allier,
The Shift Project, chargé de projet



Clémence Vorreux,
The Shift Project, coordinatrice
enseignement supérieur



Anne-Laure Tournier
The Shift Project, puis INSA Lyon,
chargée de projet

Avec l'appui de

Jacques Treiner,
The Shift Project,
président du comité des experts

Matthieu Auzanneau,
The Shift Project, directeur

Jean-Marc Jancovici,
The Shift Project, président
et de toute l'équipe de The Shift Project,

Graphisme & illustrations

Serge Nicolas, Work Division,
direction artistique, graphisme & mise en page

Virgile Bellaïche, The Shift Project,
illustrations couverture et pages intérieures

REMERCIEMENTS POUR LEURS CONTRIBUTIONS

Virgil Accary (Transition INSA), Catherine Adam (CNAM), Emmanuel Alby (INSA Strasbourg), Hülya Altinok (ISF Belgique), Younes Aoues (INSA Rouen Normandie), Céline Authemayou (Groupe INSA), Matthieu Auzanneau (The Shift Project), Rémi Babut (The Shift Project), Hugo Bachellier (CEEBIOS), Jean-Louis Bantignies (POLYTECH-Université Montpellier), Jean-Pierre Beaulier (Les Shifters), Jean-Marc Benguigui (Centrale Nantes), Laurent Bigué (ENSISA Mulhouse), Philippe Bihouix (AREP), Jean-Pascal Bois (Métamorphose SARL), Romuald Boné (INSA Strasbourg), Chrystelle Bonnabau (INSA Toulouse), Mourad Boukhalfa (INSA Rouen Normandie), Alban Bourcier (INSA Rouen Normandie), Joannie Boutigny (INSA Rouen Normandie), Mathieu Bouyer (INSA Lyon), Yves Brechet (Saint Gobain), Priscille Cadart (INSA Strasbourg), Isabelle Catto (Dauphine), Pierre Ceteaud (Les Shifters), Mélanie Champoux (Université de Sherbrooke, Québec), Ioana Ciotir (INSA Rouen Normandie), Thomas Clochon (Syntec-ingénierie), Julien Colmars (Transition INSA), Romain Colon (INSA Lyon), Olivier Cortier (Les Shifters), Nathan Coutable (Observatoire des Formations Citoyennes), Christophe Dagot (ENSIL-ENSCI Limoges), Maëlle Darnis (BNEI), Paul Darthos (ISAT), Arnaud De Maria (ISF), Thomas Defforge (INSA Centre Val de Loire), Armel Delabourdonnaye (INSA Hauts de France), Amélie Deloche (Pour un Réveil Ecologique), Philippe Dépincé (CDEFI), Véronique Desruelles (Groupe INSA), Christelle Didier (Université de Lille), Charles Dossal (INSA Toulouse), M'hamed Drissi (INSA Rennes), Michel Dubois (Réseau Ingenium), Jean-Louis Dufresne (CNRS), Guillaume Dumont (INSA Hauts de France), Laurence Dupont (INSA Lyon), Pierre Dupouet (ICAM), Cécile Dupuch (CEEBIOS), Ivar Ekeland (Dauphine), Cécile-anna Exbrayat (BEG Ingénierie), Anthony Falluel-Morel (ESITECH Rouen), Francis Faux (ISIS Castres), Fatima-Ezzahra Fekak (INSA Euro-Méditerranée), Clémentine Ferron (ENSIL-ENSCI Limoges), Frédéric Fondement (ENSISA Mulhouse), Emeric Fortin (ENPC), Jérôme Fortineau (INSA Centre Val de Loire),

gements

Frédéric Fotiadu (INSA Lyon), Marion Fregonese (INSA Lyon), Nicolas Freud (INSA Lyon), Jimmy Garcia (Ingénieurs engagés), Jacques-Olivier Garda (Innov'Active), Benoit Gaüzère (INSA Rouen Normandie), Delphine Genès (Les Shifters), Ivan Gentil (Université Claude Bernard Lyon 1), Madeleine Gilbert (CFE-CGC), Natacha Gondran (IMT Saint Etienne), Christophe Goupil (Campus de la Transition), Nicolas Gourdain (ISAE-SUPAERO), Romain Grandjean (The Shift Project), Nicolas Graves (Pour un Réveil Ecologique), Franck Guarnieri (Mines ParisTech), Arnaud Gueguen (The Shift Project), Soumia Guennoun (INSA Euro-Méditerranée), Fabien Guilloton (ISIS Castres), Hugo Herrou (Les Shifters), Clément Hias (Syntec-ingénierie), Christophe Hoarau (INSA Rouen Normandie), Virginie Hordey (INSA Rouen Normandie), Gaël Huser (Les Shifters), Chloé Huyghe (INSA Strasbourg), Christelle Iliopoulos (Les Shifters), Jean-Baptiste Jarin (Safran Helicopter Engines), Tanguy Jaumouillé (Les Shifters), Jean Jouzel (GIEC), Arthur Keller (Indépendant), Francois Kiefer (INSA Euro-Méditerranée), Félix Lallemand (Mnhn), Corinne Laurent (Groupe INSA), Anaïs Laviolette (Les Shifters), Sébastien Lemaire (INSA Centre Val de Loire), Pierre Léna (OCE), Nicolas Lenganey (Transition INSA), Patrick Leprat (ENSIL-ENSCI Limoges), Celine Lescop (The Shift Project), Hervé Leyrit (Les Shifters), Michel Lussaut (École Urbaine de Lyon), Gérald Majou de la Débutrie (CGE), Eveline Manna (Transition INSA), Claude Maranges (Groupe INSA), Laurie Marrauld (The Shift Project), Valérie Masson Delmotte (GIEC), Constance Mathieu (Les Shifters), Patrick Maurine

(INSA Rennes), Chloé Mauroy (INSA Toulouse), Jean-Luc Menet (INSA Hauts de France), Mélanie Mignot (INSA Rouen Normandie), Abdellatif Miraoui (INSA Rennes), Anne Monnier (Groupe IMT), Valérie Moreau (Collectif Ingénierie Soutenable de l'UTC), Solinne Moretti (Réseau FEVE), Caroline Mouille (Pour un Réveil Ecologique), Caroline Mouille (Pour un Réveil Ecologique), Régis Olives (Sup'EnR Perpignan), Samuel Paillat (INSA Rouen Normandie), Hugo Paris (INSA), César Perrin-Cocon (ISIS Castres), Simon Petit (Les Shifters), Jean-Stéphane Pic (INSA Toulouse), Jean-Yves Plantec (Open INSA), Sebastien Poli (INSA Strasbourg), Jean-Michel Pou (Deltamu), Isabelle Preud'homme (Les Shifters), Nicolas Raillard (The Shift Project), Mateo Ramirez (Université Lyon 3), Bertrand Raquet (Groupe INSA), Garance Regimbeau (Collectif Ingénierie Soutenable de l'UTC), Maxime Renault (BNEI), Mariana Renoux (INSA Rouen Normandie), Francois Rousset (INSA Lyon), Claude Rozé (ESITECH Rouen), Paul Saada (Transition INSA), Guy Samson (ICAM), Isabelle Schöninger (CDEFI), Pascale Simard (Agence urbaine de Lyon), Nicolas Singer (ISIS Castres), Georges Soto-Romera (ISIS Castres), Nicolas Speciale (CDEFI), Benoît Stanek (Les Shifters), Jeremie Supiot (Réseau FEVE), Caroline Thibault (Fédération des Industries Mécaniques), Baptiste Thiberge (Les Shifters), Anne-Laure Tournier (INSA Lyon), Adrien Toutant (Sup'EnR Perpignan), Sébastien Travadel (Mines ParisTech), Jacques Treiner (The Shift Project), Renata Troian (INSA Rouen Normandie), Michèle Uhring (Les Shifters), Olivier Vidal (CNRS), Delphine Viéla (ISIS Castres), Simon Vuillaume (Cegos).

PARTENAIRE

Cette publication n'aurait pas pu être réalisée sans le partenariat avec le Groupe INSA, ayant souhaité soutenir spécifiquement le projet « Former l'ingénieur du XXI^e siècle »



Ressources & références

Les Échos

« À Lyon, le projet d'aménagement Usin ravive la flamme industrielle en ville », 18 février 2020.

APEC « Quête de sens au travail : une responsabilité de l'entreprise ? », 2020.

Les Études de l'Emploi Cadre

« Situation professionnelle des cadres ingénieurs », mai 2013.

Baromètre BCG-CGE-Ipsos

« Talents – ce qu'ils attendent de leur emploi », 2021.

Bloom, Benjamin S.

« Taxonomy of educational objectives. Vol. I: Cognitive domain », New York: McKay 20, no 24 (1956): 1.

Bonnet, Emmanuel, Diego Landivar et Alexandre Monnin

Héritage et fermeture. Une écologie du démantèlement. Divergences, 2021.

Alternatives Économiques

« Bosch Vénissieux, une reconversion réussie ». Consulté le 1 octobre 2021.

CDEFI « Chiffre du mois : Les effectifs féminins en école d'ingénieurs ». Consulté le 21 novembre 2021.

CEEBIOS et Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

« Biomimétisme en France – Un état des lieux », juillet 2018.

CEEBIOS et Vertigo Lab

« La Nouvelle-Aquitaine, une région bio-inspirée : Cartographie des acteurs et évaluation des retombées socio-économiques », avril 2018.

Cerema

« La boussole de la résilience. Repères pour la résilience territoriale. » Les cahiers du Cerema. Consulté le 27 juin 2021.

CGE « Enquête insertion premier emploi », 15 juin 2021.

The Shift Project

« Crise(s), climat : plan de transformation de l'économie française ». Consulté le 16 décembre 2021.

CSA « Les salariés et la transition écologique dans les entreprises ». Consulté le 22 février 2022.

Delannoy, Isabelle

L'économie symbiotique. Actes Sud. [Actes Sud] Domaine du possible, 2017.

Didier, Christelle

Les ingénieurs et l'éthique. Pour un regard sociologique. Hermes Science Publications, 2008.

Didier, Christelle

L'éthique chez les ingénieurs (2) : Qu'est ce que l'ingénierie ? L'ingénieur, 2008, p.16

Dresner, Simon

The Principles of Sustainability, 2008.

Cité des sciences et de l'industrie

« Exposition Bio-inspirée – Le fil de l'innovation – Crédits ». Consulté le 7 octobre 2021.

INSEE « Femmes et hommes, l'égalité en question ». Références, 2017.

Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) et Office français de la biodiversité (OFB)

« Indicateurs et outils de mesure : Évaluer l'impact des activités humaines sur la biodiversité ? », mai 2021.

Gefen, Alexandre « Résilience, vous avez dit résilience ? » AOC [Analyse Opinion Critique], octobre 2020.

Gemenne, François et Aleksandar Rankovic

Atlas de l'Anthropocène. Atelier de cartographie de Sciences Po. SciencesPo Les presses, 2019.

GIEC 2014 « Changements climatiques

2014: Rapport de synthèse. » Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p., s. d.

Guyonvarch, Mélanie

« Présentation de l'ouvrage de Ph. Bihoux et K. Mauvilly (2016), Le désastre de l'école numérique. Plaidoyer pour une école sans écrans ». Formation emploi. Revue française de sciences sociales, n° 139 (15 octobre 2017): 171-76.

H. Daly and ali.

Valuing the earth. MIT Press, 1992.

Holmgren, David.

Permaculture Principles & Pathways Beyond Sustainability, 2014.

Holmgren, David, et Bill Mollison.

Permaculture One: A Perennial Agriculture for Human Settlements, s. d.

IESF. « Enquête Nationale 2021 – IESF ».

(version numérique – PDF) Consulté le 1^{er} février 2022.

Illich, Ivan. La convivialité, 1973.

ISO « ISO 14040:2006(fr), Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre ». Consulté le 11 octobre 2021.

Jarrige, François « Brèves remarques sur

les choix technologiques dans l'Histoire ». Quels choix technologiques pour une société durable ? Revue des Centraliens Hors-série (2016): 4.

La Fabrique Ecologique

« Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment développer l'innovation "low-tech" ? », 14 avril 2019.

Larrère, Catherine

« Ce que sait la montagnarde ». La Vie des idées, 30 avril 2013.

Laugier, Sandra

« Care, environnement et éthique globale », Cahiers du Genre n° 59, n° 2 (24 novembre 2015): 127-52.

Techniques de l'Ingénieur

« Le biomimétisme, un outil d'innovation durable ». Consulté le 8 septembre 2021.

ADEME « L'économie circulaire ».

Consulté le 8 octobre 2021.

INSEE « L'essentiel sur... le chômage ».

Consulté le 1^{er} février 2022.

Manciaux, Michel

« La résilience ». Etudes Tome 395, no 10 (2001): 321-30.

Marks, Elizabeth, Caroline Hickman, Panu Pihkala, Susan Clayton, Eric R. Lewandowski, Elouise E. Mayall, Britt Wray, Catriona Mellor et Lise van Susteren

« Young People's Voices on Climate Anxiety, Government Betrayal and Moral Injury: A Global Phenomenon ». SSRN Scholarly Paper. Rochester, NY: Social Science Research Network, 7 septembre 2021.

Meireles-Masbernath, Martine, Laurent Nicolas et Abdelilah Slaoui

Inventer l'avenir : l'ingénierie se met au vert. CNRS Editions., 2019.

Mumford, Lewis.

Technique et civilisation, 1950.

Géoconfluences

« Notion en débat : Anthropocène ». Document. Consulté le 15 décembre 2021.

Perrenoud, Philippe

« Apprendre à l'école à travers des projets : pourquoi ? comment ? » Consulté le 8 décembre 2021.

Persson, Linn, Bethanie M. Carney Almroth, Christopher D. Collins, Sarah Cornell, Cynthia A. de Wit, Miriam L. Diamond, Peter Fantke et al.

« Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities ». Environmental Science & Technology, 18 janvier 2022.

Programme des Nations Unies pour l'environnement

« Lignes directrices pour l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV) des produits », 2009.

The Shift Project

« Publication du nouveau rapport du Shift sur l'approvisionnement pétrolier », 27 mai 2021.

Revue des Centraliens

« Quels choix technologiques pour une société durable ? » Hors-série (2016): 54.

CTI « Références et orientations de la Commission des titres d'ingénieur », 2020.

Reghezza-Zitt, Magali

Résilience, adaptation et vulnérabilité aux changements globaux. UVED, 26 septembre 2018.

Réseau CANOPÉ, Ministère de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports

« L'Agence des usages ». Consulté le 8 décembre 2021.

RESES « Consultation Nationale Etudiante – RESES », 6 avril 2021.

Reverdy, Catherine

« L'apprentissage par projet : le point de vue de la recherche ». Technologie 186 (2013): 46-55.

Ritchie, Hannah, et Max Roser

« Energy ». Our World in Data, 28 novembre 2020.

Roby, Catherine.

« Place et fonction des sciences humaines et sociales dans les écoles d'ingénieurs en France ». Thèse de doctorat en science de l'éducation, Université Rennes 2, 2014.

Roger, Chrystelle, Félix Guégen, Kalina Raskin et Chloé Lequette

« Restitution de la journée de travail « Biomimétisme » du 29 novembre 2019 chez France Stratégie – Ceebios, Myceco – », s. d.

Société des ingénieurs et scientifiques de France (IESF)

« 29^e enquête nationale sur les ingénieurs », 2018.

Steffen, Will, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney et Cornelia Ludwig

« The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration ». The Anthropocene Review, 2 mars 2015.

Challenges

« Une grande enquête sur l'état des Français », 1^{er} septembre 2021.

UNESCO « Mobilisation des systèmes de savoirs », s. d.

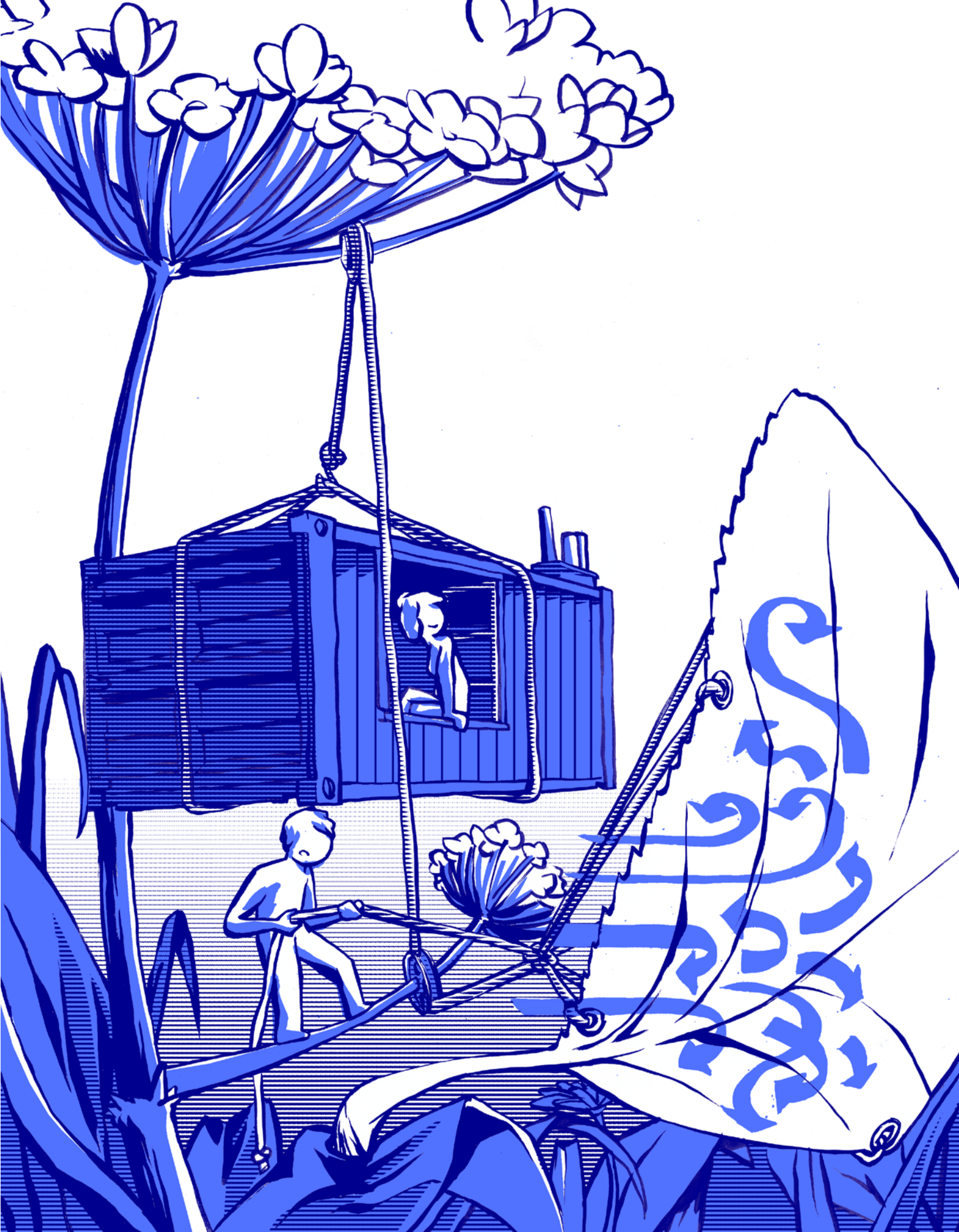
Wallace-Wells, David.

The Uninhabitable Earth. A story of the future. Penguin Books, 2019.

Witze, Alexandra. « Global 5G Wireless Networks Threaten Weather Forecasts ». Nature 569, no 7754 (26 avril 2019): 17-18.

Acronymes & abréviations

ACV	Analyse de cycle de vie	INSA	Institut national des sciences appliquées
AE	Analyse environnementale	IPBES	<i>Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i> (en Français : Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques)
AG	Assemblée générale	ISF	Ingénieurs sans frontières
BC	Bilan carbone	ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (en Français : Organisation internationale de normalisation)
CA	Conseil d'administration	ODD	Objectifs de développement durable
CDEFI	Conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs	ONU	Organisation des nations unies
CGE	Conférence des grandes écoles	PME	Petites et moyennes entreprises
CM	Cours magistral	PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
CO₂	Dioxyde de carbone	PTEF	Plan de transformation de l'économie française
COP	Conference of Parties	QSE	Qualité, sécurité, environnement
COFIL	Comité de pilotage	REFEDD	Réseau français des étudiants pour le développement durable (nouvellement RESES)
CPGE	Classes préparatoires aux grandes écoles	RESES	Réseau étudiant pour une société écologique et solidaire (anciennement REFEDD)
CPU	Conférence des présidents d'université	RH	Ressources humaines
CTI	Commission des titres d'ingénieurs	RSE	Responsabilité sociétale des entreprises
DD	Développement durable	RSI	Responsabilité sociétale des individus
DD&RS	Développement durable et responsabilité sociétale	RSO	Responsabilité sociétale des organisations
DG	Direction générale, ou Directeur général (selon contexte)	RT2012	Réglementation thermique 2012
EC	Enseignant-chercheur	SNBC	Stratégie nationale bas carbone
ECTS	<i>European Credits Transfer System</i> (en Français : Système européen de transfert et d'accumulation de crédits)	SHS	Sciences humaines et sociales
ENPC	École nationale des ponts et chaussées	SPI	Sciences pour l'ingénieur
EnR	Énergies nouvelles et renouvelables	TPE	Très petites entreprises
ESR	Enseignement supérieur et recherche	TD	Travaux dirigés
ETP	Équivalent temps plein	TP	Travaux pratiques
FIMI	Formation initiale aux métiers d'ingénieur	UE	Unité d'enseignement
GES	Gaz à effet de serre	UNESCO	Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	UVED	Université virtuelle environnement et développement durable
GT	Groupe de travail		
HCERES	Haut conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur		
IE	Ingénieurs engagés		



Quelques pistes pour faire face aux enjeux socio-écologiques du XXI^e siècle :

De quels ingénieurs a-t-on besoin ?

Quelles sciences de l'ingénieur pourront répondre aux enjeux socio-écologiques actuels ?

Comment enseigner et élaborer un programme de formation cohérent avec ces nouvelles définitions ?



The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

www.theshiftproject.org

Contacts presse :

Matthieu Auzanneau
Directeur du Shift Project et coordinateur du projet
matthieu.auzanneau@theshiftproject.org

Ilana Toledano
Responsable communication
ilana.toledano@theshiftproject.org