

# REPENSER LA FORMATION DES INGENIEURS

## POUR REpondre AU DEFI DE LA COMPLEXITE<sup>1</sup>

par Collectif IESF – Cahier Blanc 2016 D 4 et Dominique GENELOT

Ndlr. Nous sommes heureux de reprendre ici , avec l'accord du Président de L'IESF (Société des Ingénieurs et Scientifiques de France, qui regroupe les associations j d'ingénieurs de France), deux des quinze chapitres du Cahier Blanc (quinquennal) publié fin 2016 sous le titre **Relever les défis d'une économie prospère et responsable<sup>2</sup>**, chapitres intitulés « *Repenser la formation des ingénieurs pour répondre au défi de la complexité* » et « *La responsabilité éthique de l'ingénieur dans les systèmes complexes* ». Ce Cahier Blanc 2016 (240 pages) destiné à la communauté des ingénieurs et scientifiques, au monde politique, aux média et au grand public prend toute son importance dans le contexte d'ensemble exposé en Ouverture du document (et reprise dans le Livret(24 pages) qui synthétise les 15 chapitres.



*« Les ingénieurs et scientifiques, au nombre de plus d'un million, impliqués dans tous les secteurs de l'économie, agissant en contact direct avec la technologie sur le terrain, travaillant en équipes pluridisciplinaires et le plus souvent internationales, vivons cette dialectique au quotidien dans notre vie professionnelle mais également dans notre vie de citoyen.*

*La République nous a permis grâce aux cursus de l'université et des écoles, aux voies de l'apprentissage, et celles de la valorisation des acquis de l'expérience, de pratiquer des métiers enthousiasmants et gratifiants. Le sens des responsabilités, la fierté d'apporter des solutions ambitieuses, la volonté de donner du sens à l'action nous dictent de sortir du confort de la certitude technique ou supposée telles !*

Durant l'année 2016 une réflexion organisée en 13 groupes de travail a été conduite autour du thème général. Deux de ces groupes de travail étaient explicitement entrés sur les défis de la complexité, respectivement intitulés : « *Repenser la formation des ingénieurs pour répondre au défi de la complexité* » (§ D4) et « *La responsabilité éthique de l'ingénieur dans les systèmes complexes* » (§ B3)

Dominique Genelot a participé étroitement à la rédaction de ces deux chapitres. Voir Nous remercions le Président de l'ILCF de nous autoriser à les présenter intégralement sur le Site du Réseau Intelligence de la Complexité ite, en deux document parallèles..



<sup>1</sup> Version finale – IESF - GT 3 – 11 septembre 2016. Ce rapport est le fruit des réflexions d'un groupe de travail comptant des professionnels de l'éducation et de l'ingénierie, réunis pour penser le développement et l'élargissement des savoir-faire et savoir-être des ingénieurs de demain dans le cadre du livre blanc des Ingénieurs et Scientifiques de France. Il s'appuie sur les aimables et riches contributions de Maxime De Simone, élève-ingénieur et responsable du pôle représentation du bureau national des élèves ingénieurs (BNEI) ; Dominique Genelot, consultant en développement managérial auprès des entreprises, auteur de « *Manager dans (et avec) la complexité* », Eyrolles Editions ; Alexis Kummetat ; Olivier Destang ; Daniel Lecoivre ; Alain Fedon ; Guy Escoffier ; Étienne Augé,

<sup>2</sup> Voir <http://home.iesf.fr/offres/doc inline src/752/IESF LivreBlanc Consolidation.pdf>

## REPENSER LA FORMATION DES INGENIEURS POUR REpondre AU DEFI DE LA COMPLEXITE

4

*« L'ingénieur est un citoyen responsable assurant  
le lien entre les sciences, les technologies et la communauté humaine.  
Il s'implique dans les actions civiques visant au bien commun  
Il est source d'innovation et moteur de progrès. »*

Ces premières lignes de la « Charte d'éthique de l'ingénieur » élaborée par l'IESF, disent d'emblée que la responsabilité de l'ingénieur ne se limite pas à son champ scientifique et technique, mais se situe dans la mise en œuvre de son savoir et de ses compétences au service d'un développement harmonieux de l'humanité. Cet appel à être « *un moteur de progrès* » place l'ingénieur devant un énorme défi : celui de la complexité !

\*\*\*

De longue date les ingénieurs sont formés à maîtriser des techniques, à mettre en œuvre des méthodes éprouvées. Avec des bases scientifiques solides, les ingénieurs sont préparés à conduire des réalisations extrêmement compliquées, qu'ils arrivent à maîtriser en mobilisant les expertises et les moyens nécessaires. Mais à cette complication maîtrisable par l'expertise, se superpose et se combine la complexité, c'est-à-dire tout un ensemble de phénomènes non maîtrisables qui apparaissent inévitablement dans toute activité humaine et qui parfois même échappent à notre entendement.

L'ingénieur, comme l'ensemble des citoyens, se trouve de plus en plus démuni devant les défis d'une complexité, qui évolue et qui nous semble croître de jour en jour : des incertitudes grandissantes, de l'imprévisibilité, de multiples dimensions à intégrer dans les projets, une infinie diversité de points de vue et d'interactions impossibles à contrôler, des contradictions de toutes sortes, des effets pervers, des erreurs, etc.

Pour l'ingénieur la complexité s'est longtemps retrouvée dans le cœur de métier, comme à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle quand Clément Ader s'intéressait aux phénomènes aérodynamiques et leur traduction en outils de conception et de réalisation, pour finalement mettre en œuvre le premier engin motorisé volant. Il n'avait pas à se préoccuper de contraintes économiques, temporelles ou liées aux ressources... En revanche, au XX<sup>ème</sup> siècle, le cœur de métier commençait à être maîtrisé à un point tel que les militaires américains affirmaient que si on intégrait toutes les technologies dans un nouvel avion de chasse, il ne serait possible de produire qu'un seul exemplaire, avec tout le budget du Pentagone. D'où l'émergence des exigences financières, et la mise au point d'une façon de les gérer, du côté de l'ingénieur avec la gestion de projets. La complexité a décliné dans le cœur de métier mais d'une certaine manière a été compensée par celle de la gestion de projets qui, à cette époque, était à un stade très embryonnaire.

Il doit aujourd'hui répondre à des exigences techniques et financières, mais pas uniquement. Son écosystème est constitué du cœur de métier, scientifique et technique, mais également des interfaces avec d'autres métiers, autour de la finance mais aussi de l'économie, du marketing ou des ressources humaines par exemple. Cet écosystème s'étend par la prise en compte progressive de ces interfaces au fur et à mesure que celles-ci deviennent plus prégnantes, pour la conception, la réalisation et la mise sur le marché des produits dont l'ingénieur a la charge. L'ingénieur suit donc cette évolution, en mettant en place des outils et méthodes qui permettent de maîtriser au mieux ce qui relève du cœur de métier mais également, et de plus en plus, des interfaces qu'il est nécessaire de prendre en compte.

Dans une société transformée et en mutation sur tous les plans, numérique, écologique, politique, économique, dans un contexte international, la France a besoin d'ingénieurs prêts à être moteurs et concepteurs du progrès scientifique et technique – et qui contribuent en même temps à répondre aux grands défis de société. La formation des ingénieurs doit elle aussi se transformer pour répondre au défi de la complexité !

C'est à cette question que nous avons consacré notre réflexion collective, qui nous conduit à formuler les propositions qui suivent, organisées en quatre points :

1. Maintenir une formation scientifique, technique et humaine toujours à la pointe.
2. Développer l'intelligence de la complexité.
3. Développer les compétences relationnelles et collaboratives par la pratique des activités inter et transdisciplinaires.
4. Apprendre différemment, et tout au long de sa vie professionnelle.

\*\_\*\_\*\_\*

## **1 Maintenir une formation scientifique, technique et humaine toujours à la pointe**

Durant leur formation initiale, les futurs ingénieurs sont équipés de connaissances scientifiques et techniques extrêmement poussées qui leur permettent, dans des registres de plus en plus pointus et spécifiques, d'inventer et mettre en œuvre des réponses à l'appel au progrès qui leur est lancé.

Nous pensons qu'il ne faut pas baisser la garde sur ce point d'excellence. Ce n'est pas en diminuant l'intensité des formations scientifiques pour donner plus de place aux sciences de la complexité que l'on préparera mieux les ingénieurs à affronter le défi de la complexité, mais c'est en abordant les formations de façon plus systémique, en articulant les disciplines entre elles, en prenant conscience des pièges de la pensée que l'on permettra aux ingénieurs d'avoir une meilleure vision globale, une meilleure compréhension des phénomènes complexes.

### **1.1 Maintenir un socle scientifique solide et développer l'esprit critique**

Les enseignements généraux doivent bien sûr continuer à constituer la base de l'excellence scientifique de la formation des ingénieurs :

- des connaissances variées et poussées dans les disciplines classiques et en particulier : les mathématiques, les sciences physiques, la chimie et l'informatique, permettant d'acquérir un raisonnement scientifique rigoureux ;
- un socle disciplinaire solide au travers des spécialisations ;
- une culture scientifique et technique large (génie industriel, chimique, énergétique, informatique, réseaux, matériaux, etc.).

Le tout au travers d'un enseignement multiforme mêlant théorie, application, pratique, stages en entreprise et mobilités internationales, et avec un accès à des ressources diverses : livres, vidéos, interventions d'experts, etc...

L'apprentissage de ces disciplines devrait être une occasion de développer en même l'esprit critique : apprendre à décrire les limites d'une théorie, à porter sur elle un regard historique et épistémologique, et réfléchir au lent processus de déconstruction et d'évolution des théories et du renouvellement des paradigmes, à prendre conscience des multiples risques d'erreur<sup>3</sup> qui jalonnent les vastes étendues de la science. Cette réflexion épistémologique sur les sciences et techniques semble d'autant plus importante que nous pouvons désormais en quelques clics trouver sur internet la plupart des théories et méthodes, sans pour autant détenir les clés pour les comprendre, ni le recul critique pour en évaluer la pertinence.

### **1.2 Intégrer encore plus l'humain dans la préparation des ingénieurs**

La formation d'ingénieur comporte déjà de nombreux modules d'enseignement en sciences humaines et sociales, autour de la communication, du management et de la gestion des ressources humaines, du droit ou du marketing par exemple. Ils sont parfois regroupés plus largement dans les « humanités » où l'on trouve également de la culture générale ou bien de la philosophie. Les

---

<sup>3</sup> L'ouvrage collectif dirigé par Edgar Morin, réalisé pour l'UNESCO, *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, (édité par le Seuil, mais également en accès libre sur le site de l'UNESCO) consacre un chapitre saisissant aux risques d'erreur qui guettent les meilleurs cerveaux. A lire par toute personne soucieuse de rigueur intellectuelle !

références et orientations de la Commission des titres d'ingénieur<sup>4</sup> identifient la « prise en compte de la dimension organisationnelle, personnelle et culturelle » et l'« adaptation aux exigences propres de l'entreprise et de la société » comme l'une des principales compétences de l'ingénieur.

En effet l'ingénieur devra systématiquement prendre en compte les aspects humains et les intégrer pleinement dans ses réflexions et ses réalisations. Il lui faut donc tout d'abord comprendre l'homme, se comprendre lui-même et comprendre les autres, pour être en mesure de travailler avec et pour eux. Les futurs ingénieurs devront comprendre les boucles complexes qui relient esprit, culture, individu et société. En tant que cadres, responsables d'équipes, chefs de projets, ils devront être moteurs d'un progrès pas uniquement technologique, mais aussi social, éthique, politique. En ce sens, il semble indispensable de renforcer la place des humanités en la développant de manière transversale dans la formation des futurs ingénieurs. Il convient donc de préserver une part importante pour les humanités, dans le profil de formation et via des interventions et activités tout au long de l'année, mais nous pensons également que les dimensions humaine, sociale, éthique, culturelle doivent s'ancrer dans les enseignements scientifiques et techniques, ainsi que dans les projets encadrés.

Dans le portrait de l'ingénieur en 2030 de l'institut Mines-Telecom, on voit qu'au-delà de son expertise scientifique et technologique, l'ingénieur de demain devra être un technologue innovant et responsable doté de puissants savoir-être autour du relationnel, de l'art du collaboratif et de la capacité à voir et savoir utiliser le talent des autres. Il devra en effet être en mesure de vulgariser des concepts scientifiques, de présenter des idées ou des projets, de dialoguer avec des ingénieurs, des techniciens ou des experts d'autres domaines, parfois avec les médias. En ce sens, la formation des ingénieurs doit les préparer à communiquer de manière précise, soignée et adaptée à l'auditoire, donc de fait porter de l'importance à la communication, au poids des mots, du verbal et du non verbal. Nous reviendrons sur les ingrédients d'un travail collaboratif effectif dans la partie trois de ce chapitre.

### 1.3 *Préparer à l'univers numérique*

La révolution numérique a déjà transformé et va continuer à bouleverser les modes de vie, les sociétés, les civilisations et aussi les processus cognitifs et relationnels de l'humanité entière.

La préparation des ingénieurs à cet univers numérique, qui est maintenant notre univers, est fondamentale. Elle ne consiste pas seulement à acquérir la maîtrise d'objets techniques, mais plus que jamais à pratiquer une « science avec conscience ». Il s'agit notamment d'apprendre à concevoir de façon responsable des systèmes complexes, en prenant en compte à la fois les dimensions techniques, sociales, éthiques et politiques.

Il nous semble que, dans cette préparation à l'univers numérique, une vigilance particulière doit être apportée à deux points :

- Apprendre à nager avec discernement dans l'océan de données du web. En particulier, l'illusion d'objectivité que l'on est tenté d'attribuer instinctivement aux données chiffrées doit être définitivement démontée dans l'esprit des ingénieurs. Depuis Gaston Bachelard on sait que « *les données ne sont pas données, mais construites* ». Et l'ingénieur doit savoir que le constructeur de ces données, ce sera lui ! Lourde responsabilité ! D'autant plus qu'à l'heure du big data, ce constat tend à se vérifier au-delà du web, dans les entreprises, voire au quotidien.
- La conception des algorithmes est également une question lourde de conséquences. Pour le grand public les algorithmes sont des boîtes noires dans lesquelles il est impossible d'entrer. Mais l'ingénieur ne peut pas se contenter de faire confiance aux algorithmes les yeux fermés : sa responsabilité technique et éthique est de comprendre ce que ces objets programmés vont produire pour leurs utilisateurs et pour le futur de la société. Les ingénieurs doivent entrer dans la boîte noire et comprendre de l'intérieur dans quel objectif ils sont conçus. Et bien sûr, quand

---

<sup>4</sup> La version 2016 des références et orientations de la CTI est consultable en ligne à l'adresse : <http://www.cti-commission.fr/IMG/pdf/cti-ro2016-livre1.pdf>.

ils en sont les concepteurs, les ingénieurs doivent savoir évaluer les conséquences de ce qu'ils manipulent.<sup>5</sup>

Aussi, l'univers internet avec les milliards d'informations auxquelles les élèves-ingénieurs peuvent avoir accès amène à se poser des questions sur le rôle du cours magistral et les missions de l'enseignant. L'accès en quelques clics aux démonstrations, théories et concepts présentés en cours, devraient nous suggérer qu'une transformation pédagogique est à concevoir et initier. Il s'agit également de développer le discernement et le recul épistémologique des étudiants sur la façon dont ces données sont construites : par qui ? par quel processus ? dans quelles intentions ? avec quels contrôles ? etc. Et aussi de les alerter sur les conséquences de l'usage que l'on fait de ces informations.

En somme l'enjeu est d'une part le renforcement de la curiosité intellectuelle et de la capacité de questionnement, d'autre part la prise de recul et la réflexion critique, et la vigilance éthique.

## 1. Développer l'intelligence de la complexité

### 2.1. Épistémologie et complexité

Les étudiants sont équipés très tôt dans leurs cursus avec les outils mathématiques de base leur permettant de se mouvoir dans les différentes sciences et d'élaborer de nouvelles techniques pour faire face aux problèmes compliqués qu'ils auront à résoudre.

Face au défi de la complexité, il serait logique de les équiper aussi au plus tôt avec les connaissances de base en épistémologie, en sciences cognitives, en modélisation systémique, en sciences de la conception, etc. En un mot, puisque les réponses aux situations complexes qui surgissent dans l'action ne peuvent s'élaborer que dans le contexte même de cette action, ce sont avec les connaissances permettant de mieux comprendre comment élaborer la pensée dans l'action, qu'il faut équiper les étudiants.

L'épistémologie est à la complexité ce que les équations de Maxwell sont à l'énergie électrique !

En particulier, il nous semble fondamental que le futur ingénieur soit rapidement au clair avec le concept de « modélisation », qu'il comprenne que la représentation qu'il se fait du monde qui l'entoure, ou des projets qu'il conduit, n'est pas une image de cette réalité, mais une construction de son esprit, subjective, partielle (et souvent partielle) et évolutive. La rigueur scientifique devrait l'amener à une extrême prudence devant les affirmations d'objectivité et l'affichage de certitudes.

Une erreur fréquente consiste à considérer que les objets (ou les projets, ou les organisations, ou la nature) sont complexes « en soi », indépendamment de l'observateur. Mais le caractère de complexité que nous attribuons à un objet (ou à une situation) découle de la relation que nous avons avec cet objet, de la plus ou moins grande facilité que nous avons à le comprendre, à le « modéliser ». Par exemple, démonter un avion est une opération extrêmement compliquée qui nécessite des outils et des méthodes difficiles à comprendre et maîtriser. Mais aux yeux d'experts en aéronautique rompus à ce genre de pratique, l'opération n'apparaît pas complexe. En revanche, n'importe qui d'autre se retrouvant face à l'avion se sentira bien désemparé devant une situation échappant totalement à sa compréhension et sa maîtrise. Pour lui, l'opération sera perçue comme infiniment complexe, mais il suffit de lui donner la procédure à suivre et cela ne lui paraîtra alors plus complexe... mais toutefois compliqué !

Or dans la plupart des projets que nos futurs ingénieurs devront gérer, la procédure à suivre n'est pas connue, souvent même elle n'est pas connaissable. Ils devront donc affronter la complexité.

Un objet n'est ni compliqué, ni complexe en soi, il est ce qu'il est. C'est l'observateur, dans sa subjectivité et selon le projet qu'il a vis-à-vis de cet objet, qui le perçoit comme complexe ou non. L'épistémologie, que Jean Piaget définissait comme « *l'étude de la constitution des connaissances*

---

<sup>5</sup> Sur l'enjeu des algorithmes, on trouvera une réflexion très documentée dans l'ouvrage de Dominique Cardon, *A quoi rêvent les algorithmes*, Editions du Seuil, collection « *La république des idées* », octobre 2015.

*variables* », est justement l'étude de la façon dont nous construisons nos représentations de la réalité, comment nous « modélisons » les objets, les projets, les situations. C'est un mécanisme complexe, dont nous devrions avoir une conscience beaucoup plus développée, car c'est précisément l'outil mental premier que nous utilisons tout au long de notre vie pour guider notre action et nos décisions.

Le contraire de la complexité n'est pas la simplicité, mais le déni de la complexité, c'est-à-dire le simplisme ! Ce danger guette tout responsable, tout ingénieur : devant une situation difficile à comprendre, inextricable, incertaine, confuse, la tentation est forte de se replier derrière une vision partielle des choses, simple à exprimer et affirmée avec certitude comme étant la réalité. Hélas, ce simplisme facile et rassurant s'avérera inéluctablement comme une amputation de la réalité, et la complexité de la situation ressurgira en boomerang tôt ou tard.

## **2.2. Contradictions et complexité**

Comprendre la complexité c'est également comprendre que les contradictions et les antagonismes sont omniprésents : dans la nature, dans les rapports économiques, politiques et sociaux, et aussi au plus profond du cœur des hommes. Il peut s'agir d'antagonismes entre des personnes, entre des groupes d'intérêt, ou entre des points de vue. Il peut s'agir aussi de contradictions logiques, de situations indécidables. Pourtant tout au long de sa vie professionnelle, l'ingénieur sera amené à faire des choix, trouver les meilleures solutions en fonction de ses contraintes, puis appliquer et assumer ces décisions.

Le constat de ces contradictions est une évidence pour chacun d'entre nous mais, malgré cette évidence, la réaction de déni ou de refus de prendre en compte les contradictions est la plus courante. Il est très difficile d'envisager les phénomènes en conjonction, par une relation « et ». Spontanément on préfère l'exclusion « ou ». La réalité reste ambivalente, mais notre esprit simplificateur (voire simpliste) préfère l'explication simple, qu'il sait fautive, plutôt que l'explication complexe (« dialogique ») qu'il a du mal à concevoir. L'idée (fautive) que « quelque chose ne peut pas être à la fois quelque chose et son contraire » est fortement ancrée dans l'inconscient collectif.

Et pourtant, rappelons aux ingénieurs que la mécanique quantique et toutes les avancées qu'elle a permises n'existeraient pas si le grand Niels Bohr n'avait pas accepté cette dualité, qu'il a appelée le « principe de complémentarité », que l'on peut formuler ainsi : des analyses séparées d'objets peuvent mettre en évidence des propriétés contraires. Mais, bien que contraires, ces propriétés sont cependant nécessaires à l'existence de cet objet.

Onde ou photon ? Les deux à la fois, répond Niels Bohr, qui en fit sa devise : « *Contraria sunt complementa* ». C'était osé, difficile à accepter dans la logique courante, mais l'acceptation de cette « dialogique » a fait faire à la pensée des progrès considérables.

Cette dialogique de la mécanique quantique est enseignée à tous les futurs ingénieurs. Alors, pourquoi ne pas leur enseigner aussi à mobiliser ce principe dans la conduite de leur action en univers complexe ?

Face aux grands défis qu'ils devront relever autour de la santé et des biotechnologies, de l'information et du numérique, du transport ou encore de l'énergie, ils devront plus que jamais penser en système et utiliser des savoir-agir complexes. Blaise Pascal disait « *Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties.* ». Et quatre siècles plus tard, c'est précisément cela que nous devons enseigner à nos futurs ingénieurs : comment associer simplification et complexification, mobiliser au mieux leurs compétences pour construire le futur et prendre en compte les enjeux environnementaux, sociaux et économiques ?

En plus des connaissances théoriques permettant de comprendre la complexité, ses principes et ses enjeux, il faudrait proposer des applications pratiques permettant de mettre en œuvre ces savoirs et de s'en imprégner. Il serait donc formateur que l'ensemble des corpus, travaux d'application,

projets, simulations, proposés aux futurs ingénieurs durant leur formation comportent, dans toute la mesure du possible, des éléments de complexité (incertitude, imprévus, interdépendances systémiques, contradictions, ambiguïtés), qu'ils soient « contextualisés » et non présentés comme des produits « hors sol ». Il est important que les exercices de formation reproduisent le mieux possible les situations toujours empreintes de complexité que rencontrent les ingénieurs dans la réalité.

### **2.3. À propos des méthodes et outils de gestion dans la complexité**

L'exercice de la pensée complexe pour développer l'intelligence de la complexité n'est pas une incitation à dénoncer par principe le progrès technologique et à nier l'intérêt des nombreuses méthodes et outils enseignés aux ingénieurs, indispensables pour faire face à des problèmes extrêmement compliqués. Bien au contraire, nous réaffirmons que les sciences de l'ingénieur, sans cesse élargies et mises à jour au fil des avancées de la science, doivent continuer à tenir le premier rang dans la formation des ingénieurs.

Nous attirons seulement l'attention sur l'illusion que la complexité (au sens où nous l'avons définie plus haut) pourrait être « maîtrisée » par un surcroît de sophistication technique. Le défi de la complexité est d'un autre ordre. Les prodigieuses avancées scientifiques et technologiques qui permettent de fabriquer des avions plus sûrs et plus économes, des voitures sans chauffeur et des cœurs artificiels méritent le respect et l'admiration, mais elles n'empêcheront jamais la complexité de surgir au cœur de ces projets sous la forme d'imprévus, d'erreurs, de conflits d'intérêts, de dilemmes éthiques.

Nous sommes devant une situation dialogique : à la fois maintenir et développer les compétences techniques pour maîtriser des objets et des projets de plus en plus « compliqués » et savoir exercer une « pensée complexe » pour se libérer de l'illusion prométhéenne que ces compétences techniques vont permettre de « tout maîtriser ».

Ce serait un contresens de prétendre enseigner la pensée complexe de façon abstraite, séparée des techniques et méthodes dites « concrètes » enseignées par ailleurs. La pensée naît de l'action. C'est quand elle s'exerce de façon très entremêlée avec les sciences de l'ingénieur et les situations concrètes que la pensée complexe prend son sens. Mais la réciproque est également vraie : les sciences de l'ingénieur voient leur validité renforcée si, en même temps que ces acquis techniques, les ingénieurs acquièrent une véritable démarche scientifique, du discernement à l'égard des outils et méthodes, la conscience de leurs limites et des questions qu'ils soulèvent en terme d'éthique, d'écologie, d'utilité sociale, de risques systémiques.

Nous sommes conscients que cela représente un gros travail de préparation et d'accompagnement de la part des enseignants. Mais la qualité de la préparation des futurs ingénieurs à l'univers complexe qui les attend est à ce prix.

En définitive, si l'on souhaite préparer les ingénieurs au défi de la complexité, la formation d'ingénieur doit adapter ses enseignements et ses pratiques pédagogiques en y ancrant des éléments de systémique et de complexité. Il s'agit ainsi de donner aux ingénieurs la capacité à utiliser au mieux une large et précieuse palette de connaissances, savoir-faire et savoir-être, donc finalement les clefs pour voir, comprendre et bâtir le monde différemment.

*Le défi de la complexité est d'abord dans nos têtes. C'est un défi épistémologique : ce n'est pas la réalité « en soi » qui est complexe, mais notre relation à la réalité. Cette idée est le point clé des épistémologies constructivistes, que l'on peut résumer ainsi : Nos représentations, les modèles que nous élaborons, et la connaissance en général, ne sont pas un objet, ni un reflet objectif de la réalité. Ce sont des constructions de l'esprit, subjectives, contextuées, projectives, incarnées, évolutives.*

*Si l'on admet ce point de vue, on voit bien que notre responsabilité éthique se situe dans la prise de conscience et le travail réflexif que nous pouvons (devons) faire pour comprendre comment se construisent nos représentations et nos connaissances, et aussi celles des autres.*<sup>6</sup>

## **2. Développer les compétences relationnelles et collaboratives par la pratique des activités inter et transdisciplinaires.**

Dans les grands projets et les innovations actuelles, les connaissances scientifiques et techniques à mettre en œuvre sont si spécialisées qu'elles ne peuvent jamais être détenues par une seule personne. L'ingénieur est de plus en plus amené à travailler au sein d'équipes pluridisciplinaires et interdisciplinaires mettant en interaction des dimensions techniques, économiques, financières, sociologiques, politiques, éthiques.

Un nouveau degré est encore franchi lorsque des équipes se réunissent pour concevoir ensemble des projets, des transformations, des innovations de grande ampleur et de grande complexité et doivent se lancer dans l'inconnu, inventer de nouvelles méthodes, de nouveaux concepts. Dans ce contexte, la référence à des « disciplines » préexistantes perd de sa pertinence. Il s'agit d'inventer ensemble de nouvelles références théoriques « transdisciplinaires ».

Bref, qu'il s'agisse de situations « pluri » ou « inter » ou « trans »-disciplinaires, l'ingénieur exerce son métier en permanence dans des écosystèmes complexes, vastes tissus d'interdépendances intensément collaboratifs, où le moteur principal est la volonté de coopération, et la compétence première est la capacité relationnelle : comprendre l'autre, se faire comprendre, savoir écouter, savoir s'exprimer et se faire entendre, admettre que l'autre puisse avoir un point de vue différent et néanmoins pertinent, savoir faire admettre à l'autre que notre point de vue est également légitime, savoir négocier, savoir élaborer en commun des finalités partagées et des solutions satisfaisantes.

Ces capacités d'écoute et d'argumentation sont fondamentales pour permettre à l'ingénieur de prendre des décisions, ou de contribuer efficacement aux prises de décision, au sein d'une équipe de travail ou même au-delà, en tant que citoyen, en participant aux débats politiques et autres décisions collectives.

Que l'on considère ces compétences relationnelles et collaboratives d'un point de vue pragmatique, celui de l'efficacité des entreprises, ou d'un point de vue philosophique, celui du dialogue comme condition de notre humanité, la question est d'une importance capitale. Le dialogue est l'outil essentiel de la construction de notre humanité : entre chercheurs il est le moteur de la découverte ; dans le champ social et sociétal, il permet de trouver les compromis, les régulations, les ressorts de la négociation.

Or, paradoxalement, une hiérarchie implicite s'est installée entre les sciences dites dures et les sciences dites molles, portant avec elle un désintérêt de la plupart des étudiants envers les sciences de l'homme.

Tous ces arguments justifient que la formation des ingénieurs aux pratiques relationnelles et collaboratives soit beaucoup plus largement développée. Nous identifions pour cela trois axes :

- développer les compétences humaines et managériales par la formation,
- dispenser un enseignement plus multiforme, du cours magistral aux activités collaboratives transdisciplinaires,
- favoriser l'épanouissement de la personnalité des étudiants par les expériences extra-scolaires.

### ***3.1 Développer les compétences humaines et managériales par la formation***

---

<sup>6</sup> Extrait de l'ouvrage de Dominique Genelot, *Manager dans (et avec) la complexité*, 5<sup>ème</sup> édition à paraître aux Editions Eyrolles, fin 2016.



En effet, il peut s'agir tout d'abord de formations solides à la communication orale, à la prise de parole, à l'écoute active, à la conduite d'entretiens, la conduite de réunion, l'animation d'un groupe, pourraient aisément prendre une place plus importante dans les cursus.

Avec l'aide d'un coach professionnel, les étudiants pourraient par exemple bénéficier d'un accompagnement sur les relations entre membres d'une équipe et utiliser des outils permettant d'améliorer la cohésion humaine. Il s'agirait de tirer des leçons non seulement techniques mais également humaines, à l'issue des projets qu'ils réalisent, et ce grâce à une analyse et une prise de recul sur l'un des principaux moteurs de l'efficacité d'un projet : les relations entre acteurs.

### ***3.2 Dispenser un enseignement plus multiforme, du cours magistral aux activités collaboratives transdisciplinaires***

La deuxième piste que nous proposons est celle d'un enseignement plus multiforme. À l'heure du numérique, il semble tout d'abord indispensable de redynamiser en le réinventant le cours magistral et plus globalement, de repenser l'organisation classique des études.

Mais au delà des pratiques pédagogiques classiques, nous pensons qu'il faut inclure des activités, mises en situations, projets, etc. en équipes multiculturelles, multidisciplinaires, inter-établissements et/ou intergénérationnelles.

Intégrer ces pratiques nécessiterait probablement une évolution des maquettes pédagogiques, permettant d'inclure dans le parcours de formation des temps proprement dédiés à ces nouvelles activités collaboratives. Concrètement il pourrait s'agir de projets (de recherche, de réalisation,...), de serious games, de challenges et autres activités mêlant jeu et pratique - dont l'organisation inter-établissements pourrait s'établir à l'échelle des ComUE et en lien avec les acteurs du tissu industriel local. À une autre échelle, il pourrait également s'agir de projets pédagogiques internationaux menés avec les universités partenaires.

Moins éloignés des cursus classiques et désormais installés, les ateliers Artem, mis en place depuis les années 2000 par l'Ecole nationale supérieure d'art et de design de Nancy, l'ICN Business School et les Mines de Nancy, sont une initiative originale et particulièrement intéressante en matière d'acquisition des compétences collaboratives et transdisciplinaires. Plus d'une vingtaine d'ateliers sont proposés aux étudiants des trois écoles, avec une conférence et un temps de travail en équipe projet diversifiée. Cela représente, pour les étudiants, la possibilité d'accéder, en deux ou trois ans (selon l'école), à plus de 180 heures de formation à la transversalité et au travail en équipe, et à un contact privilégié avec des entrepreneurs innovants. Un retour d'expérience de ces pratiques pédagogiques qui témoignent désormais de plusieurs années d'existence serait sans doute des plus enrichissants.

### ***3.3 Favoriser l'épanouissement de la personnalité des étudiants par les expériences extrascolaires***

Enfin, une troisième piste à développer conjointement aux deux précédentes sont les expériences à l'international et en entreprises ainsi que les expériences associatives, citoyennes, solidaires, en France où à l'étranger, qui sont un excellent moyen de développer les compétences humaines des futurs ingénieurs. Aujourd'hui bien trop rares, peu encouragées et pas suffisamment valorisées, ces expériences devraient constituer un élément phare de la formation des ingénieurs français. Elles permettent en effet aux futurs moteurs du progrès technologique de s'armer d'une vision large et systémique ainsi que d'une compréhension du monde, de la nature, de la société et de l'homme, couplée à une compréhension du monde de l'industrie et des enjeux socio-économiques auxquels ils devront répondre. Cet esprit d'ouverture multiforme doit être cultivé dès les premières années de la formation d'ingénieur. C'est-à-dire être encouragé, rendu possible et valorisé par les établissements.

En ce sens les compétences collaboratives sont aussi développées par des activités extrascolaires, comme la césure en cours de cursus, les sports, les arts, les associations d'étudiants. Elles peuvent permettre de développer la créativité, l'autonomie, le relationnel ainsi que les compétences organisationnelles et managériales des étudiants, en les confrontant à des situations et des contraintes bien concrètes.

Ces activités favorisent l'épanouissement de la personnalité des étudiants, elles constituent un levier précieux de développement personnel et collectif, que les établissements d'enseignement supérieur se doivent d'exploiter au mieux. Après la transmission des connaissances scientifiques et techniques, c'est peut-être là la principale mission des écoles d'ingénieurs pour permettre à leurs étudiants de contribuer à un développement harmonieux de l'humanité.

### **3. Apprendre différemment, et tout au long de sa vie professionnelle.**

A la lecture des pages précédentes on mesure à la fois l'enjeu, l'urgence et aussi la difficulté d'une évolution profonde de la formation des ingénieurs pour répondre au défi de la complexité.

L'enjeu est celui du rôle et de la responsabilité des ingénieurs dans un monde en mutation sur tous les plans : scientifique, technologique, culturel, politique ou encore économique. L'urgence est que les transformations qui s'opèrent sous nos yeux portent des conséquences qui deviendront irréversibles non pas dans un siècle, mais dans deux ou trois décennies. Il est urgent que nos sociétés se placent rapidement en position de penser et orienter ces transformations, plutôt que de les subir passivement.

Le Cahier l'IESF publié en novembre 2013, consacré à « l'ingénieur de demain », énonçait déjà cet enjeu majeur :

*« Le premier registre de formation consiste à comprendre la société, ses problématiques, et savoir situer sa place et son rôle sociaux. Il s'agit ici de permettre d'acquérir une conscience de l'humanité vivante et de ses problèmes. L'ingénieur ne peut plus être celui qui réalise un projet décidé par d'autres sans qu'il ne s'interroge sur les finalités de ses productions. La question de la responsabilité sous ses différentes acceptions y tient ici toute sa place, mais pas seulement sous l'angle visant à limiter les effets négatifs des évolutions technologiques. Un tel paradigme est à repenser. L'ingénieur doit prendre un rôle actif et positif vis-à-vis des problématiques sociétales. »*

La difficulté pour la formation des ingénieurs est qu'il est illusoire de vouloir les préparer en 5 ans à tous les aspects de la complexité que nous avons évoqués :

D'une part, les structures et les méthodes actuelles de la formation initiale des ingénieurs ne peuvent pas se transformer elles-mêmes radicalement en une courte durée. D'autre part, il n'est pas possible de simuler dans un contexte scolaire toutes les caractéristiques, subjectives de surcroît, de la complexité : incertitude, imprévis, diversité, contradictions, etc. La complexité se découvre dans l'action, dans la confrontation à des réalités qui se laissent rarement enfermer dans nos représentations limitées et nos modélisations préconçues.

La voie que nous suggérons est de combiner deux transformations qui s'emboîtent et se complètent :

- Faire évoluer la formation initiale, pour apprendre différemment.
- Organiser tout au long de la vie professionnelle le développement personnel et collectif.

#### **4.1 Faire évoluer la formation initiale, pour apprendre différemment**

La formation initiale des ingénieurs est exigeante : un socle scientifique large, des approfondissements disciplinaires poussés, une solide culture technique, des enseignements humains (management, communication, éthique, humanités), etc... Tout cela en 5 ans seulement.

Il ne s'agit pas d'apprendre plus, ni de charger davantage les emplois du temps, ou d'allonger les cursus, mais bien d'apprendre différemment. Des transformations pédagogiques et un nouveau rapport au savoir s'imposent.

Il s'agit d'abord d'apprendre à apprendre, en conjuguant sur ce plan théorie et pratique : Sur le versant théorique il nous semble indispensable d'acquérir assez tôt dans le cursus les connaissances de base en épistémologie : qu'est-ce que la connaissance ? comment apprend-on ? comment modélise-t-on ? quelle distinction entre signes, données, informations et connaissance ? quel rapport entre objectivité et subjectivité ? entre réalité et représentation ? qu'est-ce qu'un

système ? que signifie « concevoir » ? qu'est-ce qui distingue épistémologie constructiviste et épistémologie positiviste ? etc.

Le versant pratique, imbriqué le plus possible aux acquisitions théoriques consiste à exercer une réflexion critique sur toutes les connaissances acquises, qu'elles soient de nature scientifique, technique, ou humaine. Tous les travaux et les projets réalisés, collectivement ou individuellement, devraient donner lieu à une analyse autoréflexive, conduite avec une rigueur scientifique. Il est fondamental, tout au long du cursus, de ne pas éluder la complexité des connaissances scientifiques, techniques, humaines que l'on délivre aux étudiants et dans les travaux pratiques qu'on leur propose. Dans leur vie professionnelle les ingénieurs rencontreront des situations qui n'ont pas été épurées de leurs composantes confuses, gênantes, ambiguës. Il est sain qu'ils soient préparés durant leurs études à se confronter à ces aspects de la réalité que l'on a tendance à considérer comme « irrationnels », finalement au seul prétexte qu'ils mettent en défaut les raisonnements « hors sol » auxquels nous avons été habitués lors de nos études.

Les sciences de la conception et de la modélisation devraient aussi tenir une place, brève mais intense, au début du cursus. On disait autrefois que l'ingénieur était « *quelqu'un muni d'une boîte à outils, qu'on appelait pour résoudre des problèmes* ». Nous avons aussi entendu dire que « *l'ingénieur est là pour s'occuper des tuyaux, pas de ce qui circule dans les tuyaux* ». Nous nous élevons vigoureusement contre cette vision utilitariste et simpliste de l'ingénieur ! Celui-ci ne doit pas se limiter à résoudre des problèmes formulés par d'autres, ou concevoir des tuyaux (ou des algorithmes) sans se préoccuper de ce qu'ils transportent ! L'ingénieur doit s'impliquer dans la définition des finalités des systèmes qu'il conçoit et des projets qu'il conduit. Pour nous l'ingénieur est d'abord un concepteur ! La partie la plus noble de son activité professionnelle est l'intelligence qu'il met dans la conception. Il est important qu'il ait une conscience très claire des finalités et des enjeux de ce qu'il conçoit. Concevoir un algorithme n'a pas le même enjeu s'il s'agit d'optimiser une consommation énergétique ou d'optimiser la spéculation boursière par le *high frequency trading* !

Apprendre différemment, c'est enfin, bien sûr, tirer le meilleur des nouveaux outils numériques. Malheureusement beaucoup d'innovations pédagogiques consistent souvent à faire comme avant mais uniquement en changeant le moyen de transmission de l'information ou d'évaluation des connaissances grâce aux outils informatiques. Il faut bien sûr développer l'agilité d'accès aux connaissances, mais en même temps il faut acquérir l'esprit critique, la vigilance, la curiosité et la capacité de questionnement et la vérification de l'origine et de la validité des informations. Internet et les MOOCs sont une source extraordinaire de connaissance. Il faut apprendre à en faire un usage pertinent.

La vraie innovation pédagogique sera une transformation pédagogique à la hauteur des transformations sociétales et technologiques que nous traversons. Le numérique a bouleversé nos modes de vie, nos usages, notre rapport à l'éducation et au savoir, il est temps d'engager des transformations pédagogiques permettant non seulement d'utiliser ces nouveaux outils, mais de concevoir un nouveau paradigme pédagogique.

#### ***4.2 Organiser tout au long de la vie professionnelle le développement personnel et collectif***

Les redoutables défis lancés par la complexité surgissent dans l'action. La formation initiale des ingénieurs, en cinq années, peut installer des bases, susciter curiosité et ouverture, mais ne peut prétendre les équiper pour la vie à faire face à ces défis.

La construction de l'intelligibilité des phénomènes complexes est un travail permanent, qui se développe au fil de l'action et des situations professionnelles, personnelles et citoyennes, que l'on traverse. Le penser et l'agir sont étroitement imbriqués dans une relation récursive : l'action suscite la pensée, qui rétroagit sur l'action, etc. C'est donc tout au long de notre vie que nous devons nous donner les moyens de réfléchir à la façon dont la boucle récursive « agir-penser » se

met en place dans nos façons de conduire nos responsabilités, notamment professionnelles (mais pas seulement).

Sur le plan des compétences professionnelles scientifiques et techniques, la chose est assez bien développée et de nombreux moyens existent pour permettre aux ingénieurs de se tenir à niveau dans leur champ de technicité. Mais il n'en est pas de même pour les compétences humaines et épistémologiques que nous avons évoquées. Certes, quelques formations sont organisées par les entreprises dans le cadre de la formation continue, mais sont souvent bien légères et présentées comme « une cerise sur le gâteau », une « sensibilisation » facultative.

Pour qu'un développement, personnel et collectif tout au long de la vie, de l'intelligibilité des phénomènes complexes se mette en place de façon significative dans notre pays, il nous semble que deux efforts doivent se conjuguer :

- que la graine soit vraiment semée au cours de la formation initiale,
- qu'une diversité de possibilités soient mises à la portée des ingénieurs tout au long de leur vie professionnelle.

Nous avons déjà développé le premier point : les phénomènes de complexité, le recul épistémologique, la modélisation systémique, les sciences de la conception, doivent d'une part être traités explicitement dans les cursus, et d'autre part être présents dans les travaux pratiques, projets et activités diverses des élèves ingénieurs. Mais nous invitons également les écoles à mettre à disposition de leurs étudiants des portfolios de compétences, qu'ils pourraient remplir tout au long de leur formation initiale et compléter, étoffer, diversifier, par la suite. Notons également qu'un système de crédits standardisés, sur le modèle des crédits ECTS pourrait permettre de faire de cet outil le nouveau passeport de l'ingénieur, un outil qui favorise le développement et l'élargissement des compétences.

Le deuxième point est à inventer : il s'agit de mettre en place progressivement un « écosystème de développement professionnel continu » dans lequel les ingénieurs pourront trouver l'appui, les sources d'information, les réflexions collectives, l'entraide, dont ils auront besoin aux différentes étapes de leur parcours. Les écoles d'ingénieurs pourraient devenir des centres de formation continue, non plus des lieux de passage de 3 ou 5 ans mais des véritables lieux d'échanges, de partages, d'enrichissement humain et professionnel tout au long de la vie, autour des questions et évolutions scientifiques, techniques et industrielles. Il s'agirait de permettre aux établissements de formation de mettre à disposition des lieux, des ressources, des programmes de formation, d'accompagnement, pour former et soutenir les ingénieurs tout au long de leur carrière, et accueillir des experts d'autres domaines (et pas uniquement technologiques). Cette nouvelle conception de l'école comme un lieu international et interdisciplinaire d'une part mais également bouillonnant, créatif, et intergénérationnel, serait peut-être l'un des meilleurs gages d'un progrès responsable.

Il est donc souhaitable, voire indispensable, que les initiatives constituant cet écosystème soient multiples et de natures très diverses. Les portes d'entrée dans ce courant porteur doivent être nombreuses et variées pour offrir concrètement à tout ingénieur en activité la possibilité de trouver des lieux et des modalités de réfléchir avec d'autres aux situations complexes qu'il rencontre.

Aussi, différentes approches pourraient être conjuguées : par professions, par domaines scientifiques, par régions, par écoles, par problématiques, par étapes dans la carrière, etc.

