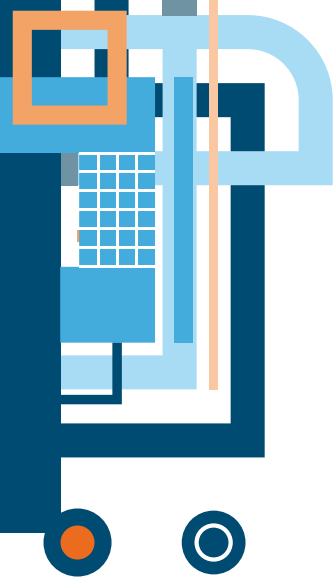


# LA COMPLEXITÉ COMME HORIZON

POSITIONNEMENT INTELLECTUEL ET STRATÉGIQUE  
DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD



Peut-on former des ingénieurs comme si le monde était simple, prévisible et maîtrisable ? Comment préparer à l'action dans des environnements marqués par l'incertitude, les interdépendances et les effets émergents ? Quelle place accorder au doute, au discernement et à la responsabilité dans la formation scientifique et technique ?

À travers ce document, l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) affirme un positionnement sur la manière de penser et d'enseigner la complexité. Celle-ci n'est pas envisagée comme un obstacle à contourner ou à réduire, mais comme une caractéristique constitutive des systèmes contemporains, appelant une compréhension renouvelée et des choix explicites en matière de formation et de pratique de l'ingénierie. En distinguant complexité faible et complexité forte, en mobilisant les apports de la pensée systémique et en interrogeant la posture de l'ingénieur face à l'incertitude, ce texte explicite les cadres conceptuels et intellectuels dans lesquels l'UTBM inscrit son action, sans prétendre en épuiser la richesse ni les tensions.

Ce positionnement conduit à promouvoir une conception élargie de l'ingénierie, attentive aux dimensions humaines, organisationnelles, éthiques et territoriales des systèmes techniques. Il engage à penser la formation en ingénierie non comme une simple accumulation de compétences techniques, mais comme un processus visant à développer le discernement, la capacité de mise en perspective et l'aptitude à agir de manière responsable dans des contextes complexes, évolutifs et partiellement incertains.

En partageant ces éléments, l'UTBM souhaite ainsi rendre visibles les voies qu'elle choisit de privilégier pour former les ingénieurs d'aujourd'hui et de demain : des ingénieurs capables de penser le long terme, d'assumer l'incertitude comme donnée structurante de l'action et de contribuer, par leurs choix et leurs pratiques, à l'élaboration de trajectoires sociotechniques soutenables, dans un monde irréductiblement complexe.



# SOMMAIRE

## **PRÉAMBULE .....4**

### **1. LA COMPLEXITÉ DES SYSTÈMES ET L'INGÉNIERIE CONTEMPORAINE**

Interroger la complexité .....	6
Séparer ce qui est seulement compliqué de ce qui est réellement complexe .....	6
Prendre acte de la complexité forte .....	7
Changer de posture pour concevoir et décider .....	8

### **2. COMMENT ENSEIGNER LA COMPLEXITÉ ? QUELS FONDEMENTS ÉPISTÉMOLOGIQUES, HISTORIQUES ET PÉDAGOGIQUES ?**

Déplacer l'acte d'enseigner .....	13
Rompre avec l'illusion analytique .....	13
Former au jugement dans des systèmes traversés par des tensions .....	13
Assumer une ingénierie sobre, humaine et responsable .....	14

### **3. LA COMPLEXITÉ COMME PRINCIPE STRUCTURANT DES MISSIONS DE L'UTBM ..... 18**

## **NOTES ..... 20**



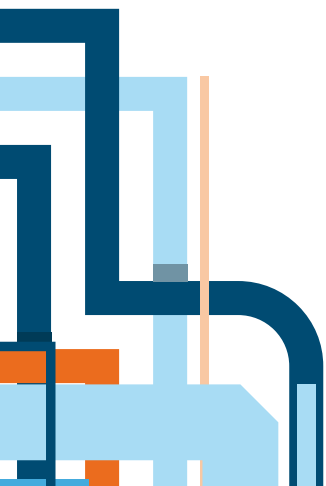
# PRÉAMBULE

## LA COMPLEXITÉ COMME UNE PERMANENCE DU MONDE CONTEMPORAIN ET COMME UN HORIZON DE RESPONSABILITÉ

La complexité s'impose plus que jamais aujourd'hui comme l'une des caractéristiques structurelles du monde contemporain. Elle n'est plus un phénomène transitoire, lié par exemple à une phase d'accélération technologique ou à une accumulation conjoncturelle de crises, mais une condition durable, dans laquelle s'inscrivent désormais les sociétés humaines, les systèmes techniques et les organisations institutionnelles. Interdépendance des systèmes, intrication des échelles spatiales et temporelles, incertitude croissante des trajectoires, multiplicité des acteurs et des rationalités, ce sont là autant de traits qui définissent un monde où l'action ne peut plus être pensée indépendamment de ses contextes et de ses effets indirects.

Cette complexité est aujourd'hui souvent vécue comme une source d'inquiétude, partout dans le monde. Elle se manifeste par un sentiment diffus de perte de maîtrise, par la difficulté à anticiper les conséquences des décisions, par l'impression que les outils conceptuels hérités ne suffisent plus à rendre le monde intelligible. Les crises systémiques contemporaines, qu'il s'agisse du changement climatique, des tensions énergétiques, des pandémies, de la numérisation accélérée ou des recompositions géopolitiques, révèlent toutes, sous des formes différentes, les limites des approches linéaires, sectorielles ou purement technicistes.

Pourtant, cette complexité n'est pas seulement un problème à résoudre ou une contrainte à subir. Elle constitue aussi un appel à renouveler les cadres de pensée et les modes de formation. Elle oblige à déplacer le regard, à renoncer à certaines illusions de contrôle et à développer des formes de rationalité plus réflexives, plus relationnelles et plus attentives aux dynamiques de long terme. Dans cette perspective, la complexité devient non pas l'ennemie de l'action, mais la condition même d'une action éclairée.





La systémique, entendue comme l'art et la science de penser les relations, les interactions et les rétroactions, est indissociable de cette compréhension de la complexité. Elle invite à considérer les artefacts techniques, les organisations et les territoires comme des ensembles dynamiques, irréductibles à leurs composantes isolées. Elle permet de substituer à la recherche d'optimisations locales une quête de cohérence globale, de robustesse et de résilience.

Le présent document s'inscrit dans cette perspective. Il ne se veut ni un programme opérationnel, ni un cadre normatif figé. Il constitue un texte institutionnel de positionnement intellectuel, par lequel l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) affirme sa manière de comprendre la complexité, les raisons pour lesquelles elle en fait un enjeu de l'ingénierie contemporaine et la façon dont cette compréhension irrigue sa conception de la formation, de la recherche et de sa responsabilité vis-à-vis de la société. Il permet ainsi de fournir un cadre de référence, capable d'éclairer les choix de l'établissement dans un monde irréductiblement complexe.

À ce titre, le document s'appuie ponctuellement sur plusieurs encarts destinés à illustrer, de manière concrète, certaines initiatives déclinant son positionnement dans la réalité de ses propres activités. Ces exemples n'ont pas vocation à dresser un inventaire exhaustif, ni à figer des pratiques par nature évolutives, mais à donner à voir, par touches successives, la manière dont la complexité irrigue, sous des formes diverses, les activités de formation et de recherche de l'institution.

# 1. LA COMPLEXITÉ DES SYSTÈMES ET L'INGÉNIERIE CONTEMPORAINE

## Interroger la complexité

Qu'est-ce que la complexité ? Peut-on la mesurer, la quantifier, ou s'agit-il d'une propriété qui échappe, au moins en partie, à toute formalisation stricte ? Ces questions traversent aujourd'hui la philosophie, les sciences de la nature et les sciences de l'ingénieur, à mesure que les systèmes étudiés et conçus deviennent plus imbriqués, plus ouverts et plus sensibles à leur environnement. La complexité s'est ainsi imposée comme une notion centrale pour comprendre les systèmes contemporains, mais également comme un point d'appui critique pour interroger les cadres d'analyse et d'action hérités de l'ingénierie classique.

Un premier éclairage peut être apporté par l'étymologie. Le terme « complexité » provient du latin *complexus*, issu du verbe *complecti*, signifiant « entrelacer » ou « embrasser ensemble ». Cette origine souligne

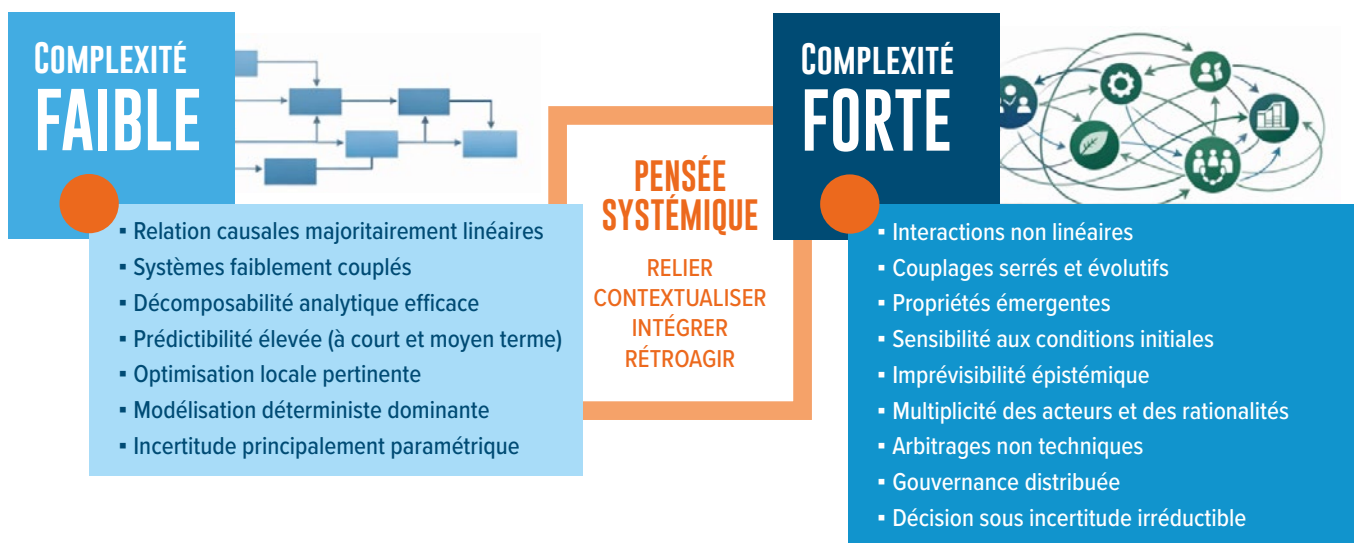
d'emblée que la complexité ne renvoie pas uniquement à la multiplicité des éléments composant un système, mais surtout à la manière dont ces éléments sont liés, articulés et mutuellement dépendants. Autrement dit, la complexité réside moins dans le nombre que dans l'enchevêtrement des relations.

Les définitions usuelles prolongent cette intuition. Les dictionnaires français désignent la complexité comme le caractère de ce qui est formé de parties nombreuses et étroitement liées, rendant l'ensemble difficile à comprendre, à analyser ou à expliquer de manière simple. Appliquée aux systèmes, cette définition opère déjà un déplacement essentiel. Dès lors, la difficulté ne provient pas tant des composants pris isolément que de leurs interactions et de l'impossibilité de déduire aisément le comportement global à partir de l'examen séparé des parties.

Aussi utile soit-elle, cette acception générale demeure toutefois insuffisante. Elle ne permet ni de distinguer les différentes formes de complexité, ni d'identifier les outils conceptuels et méthodologiques adaptés à chacune d'elles. Une réflexion plus structurée s'impose donc, afin de clarifier les régimes sous lesquels la complexité se manifeste et de comprendre les implications qu'ils emportent pour la conception et la décision en ingénierie.

## Séparer ce qui est seulement compliqué de ce qui est réellement complexe

Dans cette perspective, il est possible de distinguer deux grands régimes de complexité. Par convention, et afin de disposer d'un vocabulaire opératoire commun pour la suite, on retient ici les termes de complexité « faible » et de complexité « forte ». Cette distinction



*Attention : la complexité n'est pas synonyme de sophistication technologique. Des systèmes techniquement simples peuvent relever de la complexité forte, tandis que des systèmes technologiquement avancés peuvent relever de la complexité faible.*

ne porte aucun jugement de valeur et n'opère aucune hiérarchisation entre systèmes ou disciplines. Elle renvoie en revanche à des structures d'interactions, à des dynamiques et à des modes d'intelligibilité profondément différents, impliquant des postures d'ingénierie elles-mêmes distinctes.

La complexité dite « faible » caractérise des systèmes composés d'un grand nombre d'éléments, parfois très élevé, mais dont les interactions sont stables, bien identifiées, essentiellement linéaires et faiblement couplées. Les relations de causalité y sont globalement proportionnelles et locales, et les rétroactions, lorsqu'elles existent, restent limitées et maîtrisables. Dans ce cadre, la décomposition analytique est non seulement possible, mais efficace. Ainsi, chaque sous-système peut être étudié, modélisé et optimisé de manière relativement indépendante, sans perte significative de compréhension ni de performance globale.

Une large part de l'ingénierie classique s'est développée avec succès dans ce régime de complexité. La mécanique, l'électrotechnique ou encore l'automatique reposent sur des principes de séparation des fonctions, de standardisation et de modularité, qui permettent de contenir la complexité et de garantir la robustesse des systèmes conçus. Relèvent typiquement de ce régime le réseau électrique en régime nominal, les chaînes de production industrielle automatisées ou encore les systèmes de signalisation ferroviaire, dont le comportement global demeure largement prévisible, tant que les conditions nominales d'exploitation sont respectées.

## Prendre acte de la complexité forte

À l'opposé, la complexité dite « forte » concerne des systèmes dans lesquels les interactions sont nombreuses, évolutives, non linéaires et fortement dépendantes du contexte. Les couplages y sont serrés, les frontières entre sous-systèmes poreuses et les rétroactions multiples, parfois contradictoires. Dans ces configurations, les comportements globaux émergent des interactions locales sans pouvoir être déduits de l'analyse isolée des composants. Les phénomènes d'auto-organisation, d'émergence, d'effets de seuil ou de bifurcation rendent toute prédiction strictement déterministe illusoire, voire conceptuellement inappropriée.

Les sociétés contemporaines sont traversées par de nombreux systèmes relevant de cette complexité forte. La mobilité urbaine, par exemple, résulte d'interactions complexes entre usagers, infrastructures et politiques publiques, générant des dynamiques non linéaires et souvent contre-intuitives. Les systèmes de santé combinent une multiplicité d'acteurs, de rationalités et de temporalités, produisant des dynamiques ouvertes, marquées par l'incertitude et l'émergence. Les réseaux sociaux numériques illustrent également ce régime, où les boucles de rétroaction entre algorithmes et comportements humains engendrent des effets collectifs impossibles à déduire des règles locales ou des intentions initiales.

La distinction entre complexité faible et complexité forte permet par ailleurs de dissiper une confusion scientifique et culturelle largement répandue. C'est celle qui consiste à

assimiler complexité et sophistication technique. L'accumulation d'outils sophistiqués, d'algorithmes élaborés ou de dispositifs hyperconnectés ne constitue en rien une garantie de maîtrise de la complexité. Celle-ci ne dépend pas de la densité technologique d'un système, mais de l'interdépendance de ses éléments, de la diversité de leurs interactions et de l'imprévisibilité des effets émergents.

Un système peut ainsi apparaître hautement complexe en raison de son niveau technologique, tout en restant conceptuellement simple et largement prévisible dans ses dynamiques fondamentales. À l'inverse, des dispositifs apparemment modestes peuvent générer une complexité forte dès lors que leurs composantes interagissent de manière non linéaire ou que des acteurs humains et sociaux participent pleinement aux processus. Réduire la réflexion sur la complexité à la seule sophistication des instruments conduit à des erreurs de conception, à des systèmes fragiles ou inadaptés et à une vision de l'ingénierie centrée sur la technicité plutôt que sur l'intelligence systémique.

Se pose alors une question centrale : comment établir, au-delà du discours, que l'on se trouve effectivement confronté à une situation de complexité forte ? Sans prétendre à une mesure unique ou définitive, il est possible d'identifier un ensemble de repères permettant de qualifier, en première approximation, le régime de complexité d'un système.

Un premier repère concerne la nature des éléments du système. La complexité est faible lorsque les éléments sont peu nombreux et homogènes. Elle devient forte lorsque le système associe des composantes ►►

hétérogènes relevant de registres techniques, humains, organisationnels, économiques ou réglementaires.

Un deuxième repère porte sur les interactions entre ces éléments. La complexité est faible lorsque ces interactions sont linéaires, locales et stables. Elle est forte lorsqu'elles deviennent non linéaires, comportent des rétroactions et produisent des effets d'amplification ou de seuil.

La prévisibilité du comportement global constitue un troisième repère. La complexité est faible lorsque le comportement de l'ensemble peut être déduit de l'analyse des parties. Elle est forte lorsque des phénomènes émergents apparaissent et ne peuvent être expliqués par les composants pris isolément.

La stabilité des objectifs constitue un quatrième repère structurant. La complexité est faible lorsque les objectifs sont clairement définis et stables dans le temps. Elle devient forte lorsque ces objectifs évoluent, se transforment ou entrent en tension au cours du processus.

Le rôle des acteurs humains constitue enfin un critère majeur. La complexité peut être considérée comme faible lorsque les acteurs sont appréhendés à travers des rôles fortement prescrits et standardisés. Elle devient forte dès lors que ces acteurs portent des rationalités plurielles, disposent de marges d'interprétation et participent activement, par leurs décisions et leurs interactions, à la coévolution du système.

À ces critères s'ajoute le rapport à l'incertitude. La complexité est faible lorsque l'incertitude peut être assimilée à un risque mesurable. Elle est forte lorsque l'incertitude est irréductible et empêche la définition d'une solution optimale unique.

Ces repères ne constituent ni une grille normative, ni un outil de diagnostic exhaustif. Ils visent avant tout à outiller la réflexion et l'action en

ingénierie, en permettant d'identifier le régime de complexité auquel une situation se rattache et d'adapter, en conséquence, les modes de pensée, les méthodes et la posture adoptée.

### Changer de posture pour concevoir et décider

Historiquement, l'ingénierie s'est constituée comme une activité de conception et d'action mobilisant des capacités d'analyse, de modélisation, de jugement et de décision dans des contextes relativement stabilisés. Longtemps, ces contextes ont été caractérisés par des environnements techniques et organisationnels où les problèmes étaient largement formalisables et les effets des solutions globalement prévisibles. Ces situations relèvent majoritairement de la complexité faible.

Toutefois, cet horizon ne constitue plus aujourd'hui la norme dominante. La multiplication des interdépendances entre systèmes techniques, humains et environnementaux, l'accélération des transformations technologiques, la prise en compte incontournable des enjeux environnementaux et sociaux et l'émergence de dynamiques globales difficilement anticipables déplacent progressivement l'activité des professionnels de la conception et de l'action technique vers des situations relevant davantage de la complexité forte.

Dans ces contextes, la complexité ne se manifeste pas principalement dans la sophistication des objets conçus, mais dans la manière dont les systèmes interagissent et coévoluent. Les artefacts techniques s'inscrivent dans des réseaux d'interdépendances multiples, au sein desquels la performance d'un élément ne peut être évaluée indépendamment de celle du système global et de son environnement.

Cette évolution appelle un élargissement de la posture en ingénierie. Sans disqualifier les

#### EXEMPLE À L'UTBM Projets métiers



Pour renforcer la cohérence et la pertinence de ses formations d'ingénieur, l'UTBM a organisé ses maquettes autour de filières métiers. Chaque filière regroupe des unités d'enseignement qui abordent de manière cohérente une thématique professionnelle sous différents angles (par exemple, la robotique, l'intelligence artificielle ou encore la conception centrée utilisateur). Au sein de chaque filière métier, une unité d'enseignement « projet » offre aux apprenants l'occasion de mettre en pratique leurs connaissances et compétences en résolvant une problématique technique complexe, favorisant ainsi leur préparation à la réalité des métiers d'ingénieur.

Par ailleurs, le projet de fin d'études d'ingénieur, réalisé en entreprise, constitue une étape structurante du parcours de formation. Il permet aux étudiantes et étudiants de mobiliser, de manière intégrée, l'ensemble des connaissances et compétences acquises tout au long de leur cursus, dans un contexte professionnel réel, marqué par des contraintes techniques, organisationnelles, économiques et humaines. Confrontés à des problématiques ouvertes, rarement entièrement définies a priori, les futurs ingénieurs sont amenés à composer avec des enjeux multiples, des acteurs aux rationalités diverses et des objectifs parfois contradictoires. À ce titre, le projet de fin d'études représente une expérience privilégiée d'immersion dans la complexité des milieux sociotechniques, préparant les diplômés à exercer leur métier avec autonomie, réflexivité et sens des responsabilités.

approches analytiques et les démarches d'optimisation, elle requiert une capacité accrue à raisonner à différentes échelles, à explorer des scenarii, à intégrer des incertitudes et à considérer les conséquences de long terme des choix techniques. L'enjeu n'est pas de renoncer aux compétences traditionnelles, mais de les inscrire dans une démarche plus systémique et réflexive, intégrant des dimensions techniques, organisationnelles, sociales et éthiques.

La complexité forte se manifeste par la coexistence de dimensions structurellement tensionnelles, telles que l'efficacité et la résilience, la robustesse et l'adaptabilité, la performance économique et la soutenabilité environnementale, ou encore la performance opérationnelle et la résilience sociale. L'efficacité tend à réduire les marges afin d'optimiser le

fonctionnement des systèmes, tandis que la résilience repose sur l'existence de ces marges pour absorber les chocs et s'adapter aux perturbations. De même, la robustesse vise le maintien des fonctions essentielles face à des perturbations identifiées, alors que l'adaptabilité suppose des flexibilités et l'acceptation de fragilités localisées pour faire face à l'imprévu. La performance économique privilégie souvent l'optimisation à court terme, quand la soutenabilité environnementale implique l'internalisation de coûts et une temporalité plus longue. Enfin, la performance opérationnelle peut entrer en tension avec la résilience sociale, qui soutient l'engagement collectif et la capacité d'adaptation face aux crises. Ces tensions ne relèvent pas d'oppositions binaires, mais de compromis dynamiques à construire et à ajuster dans le temps.

Ainsi comprise, la complexité forte invite à une ingénierie orientée vers la sobriété, la résilience et l'adaptabilité. La véritable intelligence technique ne consiste pas à accumuler des fonctionnalités, mais à concevoir des systèmes robustes dans leur usage, capables d'évoluer et de demeurer pertinents dans des environnements incertains. Dans cette perspective, la pratique de l'ingénierie s'affirme comme une médiation entre technologie, société et environnement. L'enjeu des formations en ingénierie est dès lors clair : apprendre à penser et à agir dans la complexité forte, en développant des compétences pluri- et transdisciplinaires et une posture stratégique où rigueur technique, pensée systémique et responsabilité éthique convergent.



## FOCUS

### La systémique, fondement de la pensée en complexité

La systémique trouve ses racines, de manière lointaine et conceptuelle, dans les réflexions philosophiques sur l'interconnexion des idées et des phénomènes. Dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, l'abbé Étienne Bonnot de CONDILLAC<sup>1</sup> (1715-1780) soulignait l'importance de comprendre les objets de connaissance dans leur contexte global, à travers l'analyse des relations entre sensations, expériences et idées. Pour CONDILLAC, la pensée humaine et la connaissance ne peuvent se réduire à l'étude isolée des parties. Elles se construisent au contraire par des associations successives et un processus cumulatif et dynamique, annonçant déjà la nécessité de considérer les systèmes dans leur totalité et de penser les interdépendances.

Au XX<sup>e</sup> siècle, cette intuition philosophique a trouvé des prolongements méthodologiques et scientifiques dans la systémique moderne, qui cherche à formaliser et à analyser les interrelations entre composants et les propriétés émergentes des systèmes. Par exemple, Gaston BERGER<sup>2</sup> (1896-1960), philosophe et épistémologue français, a apporté une contribution pionnière en élargissant la réflexion systémique à la dimension prospective et humaine.

Son approche, centrée sur la rationalité, la décision et l'anticipation des évolutions sociales et technologiques, a influencé le développement d'une pensée de la complexité appliquée aux organisations et à la conception des systèmes, en insistant sur l'importance de la cohérence, de la prévision et de l'orientation des actions dans des environnements interdépendants.

La systémique peut ainsi se définir comme l'étude des systèmes, entendus comme des ensembles d'éléments en interaction dont le comportement global ne peut se réduire à la simple somme des comportements individuels. Elle s'intéresse aux propriétés émergentes, aux boucles de rétroaction et aux interdépendances qui caractérisent les ensembles organisés, qu'il s'agisse de systèmes biologiques, techniques, sociaux ou économiques. Elle se distingue de l'approche analytique classique, qui fragmente les problèmes en parties isolées, et propose, au contraire, une vision holistique, où chaque élément prend sens dans l'ensemble auquel il appartient. ▶▶

Plusieurs grands principes structurent la pensée systémique. Tout d'abord, le principe d'interdépendance souligne que les composants d'un système ne peuvent être compris isolément. Ainsi, toute modification d'un élément a des effets sur l'ensemble. Ensuite, le principe de rétroaction met en évidence les boucles où les sorties d'un processus influencent ses entrées, générant des régulations ou des dynamiques imprévisibles. Le principe d'émergence souligne que les propriétés globales d'un système ne sont pas déductibles de celles de ses éléments pris individuellement. Conséquemment, la cohésion, la résilience ou la créativité d'un système résultent de l'interaction dynamique de ses composantes. Enfin, le principe de finalité et de contextualité indique que tout système fonctionne en relation avec son environnement et que sa compréhension nécessite d'appréhender les interactions avec les systèmes voisins, ainsi que les contraintes et objectifs qui orientent ses dynamiques.

L'histoire de la systémique moderne repose sur l'apport de plusieurs figures scientifiques majeures. Ludwig von BERTALANFFY<sup>3</sup> est considéré comme le père de la théorie générale des systèmes, visant à identifier des lois et principes valables pour tous les types de systèmes, biologiques ou artificiels. Norbert WIENER<sup>4</sup>, fondateur de la cybernétique, a introduit le concept de régulation et de rétroaction dans les systèmes techniques et vivants, mettant l'accent sur la communication et le contrôle comme facteurs de stabilité et d'adaptabilité. Ross ASHBY<sup>5</sup>, autre pionnier de la cybernétique, a formalisé des notions de complexité, de régulation et de stabilité dans les systèmes dynamiques. Dans les sciences sociales et organisationnelles, Stafford BEER<sup>6</sup> a développé la cybernétique de gestion, appliquant les principes systémiques à la gouvernance des entreprises et des sociétés. D'autres chercheurs, tels que Heinz von FOERSTER<sup>7</sup> et Gregory BATESON<sup>8</sup>, ont élargi la portée de la systémique à l'épistémologie, à la cognition et à la communication, soulignant l'importance de la réflexion sur le rôle de l'observateur et sur la circularité des interactions dans les systèmes vivants et sociaux.

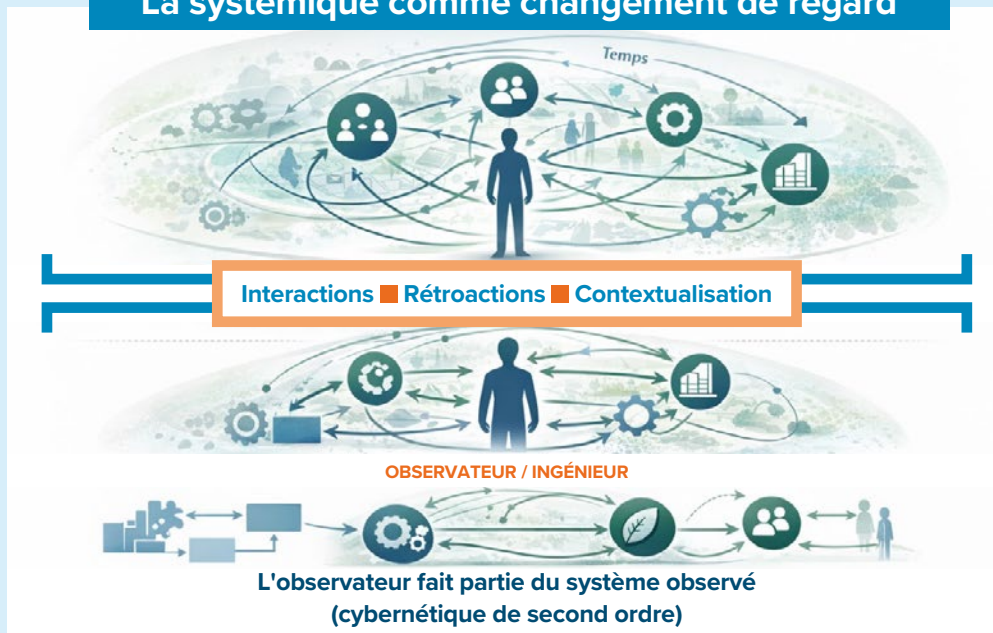
Ainsi, la systémique ne se limite pas à une simple méthode de modélisation. Elle constitue, au contraire, une posture intellectuelle, un cadre pour penser l'interconnexion et l'émergence, ainsi qu'un outil stratégique pour l'ingénieur confronté à la complexité forte. Elle permet de dépasser la linéarité des approches traditionnelles et de développer une compréhension globale, capable d'articuler innovation technique, analyse prospective et responsabilité éthique. Dans le contexte de l'ingénierie contemporaine, la systémique offre ainsi un horizon indispensable pour concevoir des systèmes robustes, adaptatifs et soutenables, en intégrant simultanément les dimensions techniques, humaines et environnementales.

Les travaux contemporains sur les transitions écologiques, énergétiques et sociotechniques prolongent et renouvellent aujourd'hui la pensée de la complexité et de la systémique. Ils envisagent les sociétés industrielles comme des systèmes adaptatifs complexes, caractérisés par des régimes de fonctionnement relativement stables, mais susceptibles de basculer sous l'effet de perturbations cumulées ou de changements de contraintes.

Dans cette perspective, les transitions ne peuvent être conçues comme de simples substitutions technologiques, mais comme des processus de transformation systémique impliquant des infrastructures, des pratiques sociales, des modèles économiques et des cadres institutionnels. La notion de résilience socio-écologique permet alors de penser la capacité d'un système à absorber les chocs, à se réorganiser et à évoluer sans perdre ses fonctions essentielles.

Cette approche invite à déplacer le regard de l'optimisation vers l'adaptation et de la performance instantanée vers la soutenabilité à long terme. Elle conforte l'idée selon laquelle l'ingénierie doit moins chercher à maîtriser entièrement les systèmes qu'à en accompagner les dynamiques, en concevant des dispositifs flexibles, évolutifs et capables d'apprentissage collectif.

## La systémique comme changement de regard



*La pensée systémique ne cherche pas à supprimer l'incertitude, mais à agir lucidement dans un monde irréductiblement complexe.*

### Quelques références bibliographiques (liste non-exhaustive) :

- Bertalanffy, Ludwig von (1968). *General System Theory*. Pub. George Braziller Inc. New-York, NY, USA
- Wiener, Norbert (1948). *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge. Pub. MIT Press, Havard, MA, USA
- Ashby, W. Ross (1952). *Design for a Brain*. Pub. Chapman & Hall, London, UK
- Ashby, W. Ross (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Pub. Chapman & Hall, London, UK
- Beer, Stafford (1972). *Brain of the Firm: The Managerial Cybernetics of Organization*. Pub. Allen & Unwin, London, UK
- Bateson, Gregory (1977). *Vers une écologie de l'esprit*. Pub. Seuil, Paris, France
- Berger, Gaston (1964). *Phénoménologie du temps et prospective*. Pub. Presses Universitaires de France, Paris, France
- Forrester, Jay W. (1968). *Principes des systèmes*. Pub. Presses Universitaires de Lyon, France
- Le Moigne, Jean-Louis (1977). *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris, France
- Le Moigne, Jean-Louis (1999). *La modélisation des systèmes complexes*. Pub. Dunod, Paris, France



# Intelligence artificielle et complexité

L'intelligence artificielle (IA) constitue aujourd'hui probablement l'une des manifestations les plus significatives de la complexité forte des systèmes contemporains. Elle ne se réduit ni à un outil isolé, ni à un ensemble d'algorithmes autonomes, mais s'inscrit, au contraire, dans des systèmes ouverts et évolutifs, où interagissent données, modèles, infrastructures techniques, acteurs humains, organisations et cadres normatifs. Dans ce contexte, l'IA n'est pas extérieure aux dynamiques qu'elle contribue à analyser ou à soutenir. Elle en devient l'une des composantes, susceptible d'en infléchir les équilibres.

La complexité forte de l'IA tient en partie à la nature de ses mécanismes internes. Les modèles d'apprentissage, en particulier lorsqu'ils reposent sur des architectures profondes ou adaptatives, peuvent produire des comportements difficiles à relier simplement à leurs règles de conception initiales. Les relations entre données, paramètres et résultats sont souvent non linéaires, sensibles aux contextes d'usage et dépendantes des conditions de déploiement. L'incertitude qui en découle ne relève pas uniquement d'un manque temporaire de connaissance, mais est intrinsèque à la dynamique même de ces systèmes.

Cette complexité est renforcée par l'inscription de l'IA dans des environnements sociotechniques marqués par des interactions multiples. Les usages des systèmes algorithmiques influenceront, de plus en plus, les comportements humains, les modes d'organisation ou les cadres décisionnels, lesquels modifieront en retour les données produites et les conditions d'apprentissage ultérieures. Ces boucles de rétroaction, souvent peu visibles, généreront des effets indirects, différés ou non

intentionnels, sans pouvoir être anticipées aujourd'hui de manière exhaustive.

L'IA met également en tension des dimensions souvent abordées jusqu'alors séparément, comme l'efficacité et la compréhension (des systèmes peuvent produire des résultats performants sans que les mécanismes mobilisés ou les conditions de validité soient pleinement intelligibles), l'automatisation et la responsabilité (la délégation de fonctions décisionnelles peut rendre plus diffuse l'identification des responsabilités humaines, organisationnelles ou institutionnelles) ou encore l'optimisation locale et la soutenabilité à long terme (l'amélioration ciblée d'indicateurs à court terme peut engendrer des effets de report, des dépendances ou des coûts environnementaux et sociaux perceptibles seulement à une autre échelle ou dans la durée).

En ce sens, l'intelligence artificielle invite à interroger les limites des approches strictement instrumentales de la technologie. Elle rappelle que toute modélisation constitue une réduction du réel, que la prédiction ne se confond pas avec la maîtrise et que la décision technique s'inscrit toujours dans un contexte plus large d'incertitudes, de valeurs et de finalités.

Penser l'IA à l'aune de la complexité forte conduit ainsi à privilégier une posture systémique et réflexive, attentive aux interactions, aux contextes et aux marges d'incertitude. Il ne s'agit ni de rejeter l'IA, ni de lui attribuer un rôle déterminant a priori, mais de reconnaître pleinement qu'elle participe à des dynamiques sociotechniques complexes, dont les effets dépendent des usages, des cadres et des choix collectifs qui l'accompagnent.

## 2. COMMENT ENSEIGNER LA COMPLEXITÉ ? QUELS FONDEMENTS ÉPISTÉMOLOGIQUES, HISTORIQUES ET PÉDAGOGIQUES ?

### Déplacer l'acte d'enseigner

Former des ingénieurs capables d'évoluer lucidement et efficacement dans des environnements relevant de la complexité forte implique de dépasser les cadres traditionnels de l'enseignement supérieur. Il ne s'agit plus seulement de transmettre des savoirs disciplinaires stabilisés et des savoir-faire pour permettre le développement chez chacun des compétences associées, mais de développer des esprits capables d'affronter l'incertitude, de raisonner dans des contextes ouverts, de penser les interactions et de construire des jugements éclairés en situation d'information incomplète. Enseigner la complexité revient ainsi à interroger les fondements mêmes de l'acte de connaître et de déployer une compétence, et à expliciter une épistémologie adaptée aux défis contemporains.

### Rompre avec l'illusion analytique

Historiquement, l'enseignement scientifique et technique s'est structuré autour d'un paradigme analytique hérité du cartésianisme<sup>9</sup>, fondé sur la décomposition des phénomènes, la recherche de relations causales « simples » et la séparation des disciplines. Ce paradigme a produit des avancées considérables et reste pertinent pour l'étude de nombreux systèmes relevant de la complexité faible. Toutefois, il atteint ses limites dès lors que les phénomènes étudiés se caractérisent par des interactions multiples, des rétroactions non linéaires et des dynamiques

émergentes. Les grandes ruptures de l'histoire des sciences montrent que ces limites ont souvent été dépassées par l'émergence de nouveaux cadres conceptuels, comme par exemple la thermodynamique hors équilibre, la cybernétique, l'écologie scientifique ou encore les sciences des réseaux. Introduire la complexité forte dans la formation de l'ingénieur s'inscrit donc dans une histoire longue du savoir, marquée par des déplacements successifs du regard scientifique. Dans cette perspective, enseigner la complexité ne peut se réduire à ajouter de nouveaux contenus. Il s'agit, avant tout, de développer des compétences réflexives transversales. Les étudiantes et étudiants doivent être capables de formuler des problèmes ouverts, d'identifier des niveaux d'organisation pertinents, de reconnaître des boucles de rétroaction et de raisonner en termes de scénari plutôt que de prédictions déterministes. Cela suppose de les confronter régulièrement à des situations où les objectifs sont partiellement contradictoires, où les données sont incomplètes et où les choix nécessitent des compromis explicites.

### Former au jugement dans des systèmes traversés par des tensions

Penser les systèmes complexes implique également de reconnaître que ces derniers sont traversés par des conflits d'intérêts, de valeurs et de rationalités, impossibles à résoudre uniquement par l'expertise technique. Les systèmes sociotechniques associent une pluralité d'acteurs ►►

EXEMPLE À L'UTBM



### Élaboration de fresques du futur

Dans le cadre de l'unité de valeur « Initiation aux enjeux de la transition écologique pour un développement durable », les élèves-ingénieurs sont invités à élaborer, par groupe, une fresque du futur, en se projetant à l'horizon 2050. Cet exercice vise à les amener à formuler des récits désirables, fondés sur une compréhension systémique des transformations écologiques, sociales, économiques et technologiques à l'œuvre. Inspirée de démarches telles que la fresque du climat, la fresque du futur est un outil collaboratif et visuel permettant de représenter, de manière structurée, les interactions, rétroactions et dynamiques complexes qui façonnent les milieux sociotechniques. À partir de connaissances établies et d'hypothèses argumentées, les étudiants construisent collectivement un récit prospectif intégrant incertitudes, bifurcations possibles et choix de conception. Cette approche pédagogique s'inscrit pleinement dans l'appréhension de la complexité forte : elle dépasse les logiques linéaires et sectorielles pour favoriser une pensée relationnelle, réflexive et contextualisée. En articulant analyse systémique et imagination prospective, la fresque du futur constitue ainsi un levier de formation à une ingénierie responsable, capable de concevoir et d'agir dans des milieux durablement transformés.

(acteurs socio-économiques, pouvoirs publics, citoyens, usagers, experts ou organisations intermédiaires, etc.) dont les objectifs, les temporalités et les contraintes sont souvent partiellement incompatibles. Dans ce contexte, les professionnels de la conception et de l'action technique sont également confrontés à des arbitrages non techniques. Ils doivent ainsi composer entre performance économique et soutenabilité environnementale, rapidité de déploiement et coévolution sociale, robustesse et équité territoriale ou sociale. Ces décisions relèvent moins de la résolution technique que du jugement et engagent une responsabilité éthique, comprise comme la capacité à agir avec discernement face à des dilemmes où aucune solution n'est pleinement satisfaisante.

La gouvernance des systèmes complexes ne peut donc se réduire à une chaîne hiérarchique ou à une simple agrégation de décisions sectorielles. Elle exige des dispositifs capables d'organiser le dialogue entre acteurs, de rendre explicites les hypothèses et valeurs sous-jacentes aux choix techniques et de gérer les désaccords de manière constructive. Former à la complexité consiste donc également à préparer les futurs professionnels à évoluer dans des espaces de gouvernance partagée, où la légitimité des décisions repose autant sur leur robustesse technique que sur leur intelligibilité, leur transparence et leur acceptabilité collective. Les projets intégrateurs offrent des occasions privilégiées pour expérimenter cette approche. En mobilisant simultanément des compétences plurielles, ils permettent de mesurer concrètement les effets parfois contre-intuitifs des décisions techniques.

## Assumer une ingénierie sobre, humaine et responsable

Parallèlement, une attention particulière doit être portée aux dimensions humaines et organisationnelles des systèmes techniques. De nombreux échecs industriels ou technologiques trouvent leur origine non dans une erreur technique isolée, mais dans une mauvaise articulation entre dispositifs techniques, organisations, procédures et comportements humains. Former à la complexité inclut donc la prise en compte des facteurs humains, sociaux et culturels comme composantes à part entière des systèmes conçus. Dans ce cadre, la sobriété technologique, définie comme « la technologie au juste besoin », apparaît comme un objet pédagogique particulièrement fécond. Loin de s'opposer à la complexité, elle en constitue une application exigeante : il ne s'agit pas de réduire indifféremment les moyens techniques, mais d'apprendre à discerner, hiérarchiser et arbitrer. La compréhension des systèmes complexes permet ainsi d'identifier les leviers réellement efficaces, d'éviter les solutions surdimensionnées et de concevoir des architectures performantes, robustes et les plus économes possibles en ressources.

Enfin, la complexité forte introduit une dimension éthique irréductible dans l'acte d'ingénierie. Lorsque les systèmes sont caractérisés par l'incertitude, la non-linéarité et l'émergence, les conséquences des décisions ne peuvent être ni entièrement prévues, ni totalement maîtrisées. L'éthique, entendue comme l'ensemble des principes et valeurs guidant le comportement responsable face à des dilemmes,

suppose une capacité de discernement et d'anticipation des effets indirects, différés ou inattendus des choix techniques. Agir de manière responsable dans un monde complexe ne signifie pas éliminer le risque, mais reconnaître les limites de la connaissance, expliciter les incertitudes et accepter la possibilité de l'erreur, en intégrant pleinement la responsabilité sociale, environnementale et humaine dans la pratique de l'ingénieur.

EXEMPLE À L'UTBM

### Sciences humaines et sociales et pensée systémique



L'UTBM consacre une part significative de son cursus d'ingénieur aux sciences humaines et sociales. Le pôle Humanités assure une ouverture sur l'histoire, la sociologie, la philosophie, le droit, l'économie, les langues et la communication, contribuant à développer l'esprit critique, la compréhension des enjeux sociaux et culturels, ainsi que l'analyse des interactions entre technologies et sociétés. Ces enseignements représentent environ 20 % des volumes pédagogiques sur les cinq années de la formation d'ingénieur et ne sont pas perçus comme un simple « supplément d'âme », mais comme une composante pleinement intégrée de la formation technologique, visant à préparer les futurs ingénieurs à appréhender les facteurs humains, sociaux et organisationnels comme des éléments constitutifs des systèmes complexes qu'ils seront appelés à concevoir, piloter et transformer.

## EXEMPLES À L'UTBM

### Play & Pulse et conception en environnement incertain



Des démarches développées par les enseignants-chercheurs de l'établissement, telles que Play & Pulse ([openlab.utbm.fr/play-n-pulse](http://openlab.utbm.fr/play-n-pulse)), fondées sur le design thinking, la conception centrée utilisateur et l'innovation participative, placent les étudiants dans des situations où les besoins sont évolutifs, les contraintes multiples et les solutions émergentes. Elles favorisent l'apprentissage de l'itération, de l'écoute et de l'adaptation, compétences clés pour agir dans des systèmes complexes et ouverts.

### Innovation CRUNCH Time et hybridation des compétences

L'Innovation CRUNCH Time ([innovation-crunch.utbm.fr](http://innovation-crunch.utbm.fr)) constitue une illustration emblématique. Ce dispositif pédagogique réunit, sur une courte période, des étudiants de niveaux et de spécialités variés autour de problématiques réelles proposées par des partenaires industriels, institutionnels ou associatifs. Les étudiants y sont confrontés à des problèmes ouverts, initialement mal définis, nécessitant une intégration simultanée de compétences scientifiques, techniques, organisationnelles, créatives et relationnelles. Ce format favorise l'apprentissage de la co-créativité, de la gestion de l'incertitude, du prototypage rapide et de l'arbitrage entre contraintes multiples. Il matérialise concrètement la transformation du métier d'ingénieur face à la transversalité et à la complexité croissantes des enjeux contemporains.

### Fresque de l'innovation

La fresque de l'innovation, développée à l'UTBM en collaboration avec Innover mâlin, constitue un dispositif pédagogique visant à représenter l'innovation non comme une succession linéaire d'étapes, mais comme un processus systémique, traversé par des interactions multiples entre acteurs, usages, contextes, contraintes et valeurs.

En rendant visibles les interdépendances, les rétroactions et la pluralité des trajectoires possibles, la fresque conduit les élèves-ingénieurs à appréhender l'innovation comme un phénomène intrinsèquement complexe, irréductible à une logique de cause-effet simple ou à une optimisation locale. Elle favorise ainsi une compréhension relevant de la complexité forte, où les effets émergents, les incertitudes et les bifurcations jouent un rôle structurant.

À travers la construction collective d'un récit partagé de l'innovation, cette approche développe une posture de conception attentive aux milieux sociotechniques, à la robustesse des choix et à leur inscription dans des dynamiques de long terme.

### Unité d'enseignement « innovation en système complexe »

Au sein du Master « Ingénierie des Systèmes Complexes » de l'UTBM, l'unité d'enseignement « Innovation en système complexe » s'inscrit dans une formation qui aborde les systèmes complexes tant dans leurs fondements que dans leurs applications à des milieux sociotechniques variés. Cet enseignement contribue à l'acquisition d'une compréhension académique de la complexité, en accompagnant l'étude de ses dimensions structurelles, dynamiques

et émergentes par des exemples concrets issus de milieux sociotechniques. Il vise à former des ingénieurs capables de concevoir, analyser et innover dans des environnements où les rétroactions, les incertitudes et les interdépendances sont constitutives des défis à relever.

### Unité d'enseignement « innover autrement - conception orientée milieux sociotechniques »

La conception orientée milieux sociotechniques considère les objets techniques, les infrastructures et les systèmes d'ingénierie comme indissociables des environnements humains, sociaux, culturels et institutionnels dans lesquels ils s'inscrivent. Elle invite à dépasser une approche centrée sur l'objet ou la performance isolée, pour prendre en compte les usages, les acteurs, les temporalités, les valeurs et les dynamiques de transformation des milieux concernés.

Dans cette perspective, les récits oubliés désignent l'ensemble des expériences, savoirs, pratiques et trajectoires sociotechniques qui ont été marginalisés ou invisibilisés par les récits dominants de l'innovation et du progrès technique. Leur oubli résulte moins d'une obsolescence que de choix de conception, de cadres normatifs ou de rationalités qui ont privilégié certaines solutions au détriment d'autres.

Réintégrer ces récits dans les démarches de conception permet de mieux appréhender la complexité des milieux sociotechniques, d'en révéler les tensions et les interdépendances, et d'ouvrir l'espace des possibles en matière de robustesse, d'appropriation et de soutenabilité des systèmes conçus.



## L'éthique de l'ingénieur à l'épreuve de la complexité forte

L'éthique de l'ingénieur trouve ses racines dans une réflexion ancienne sur la responsabilité de l'action humaine face à l'incertitude et aux conséquences de ses choix. Dès la philosophie morale classique, ARISTOTE soulignait que l'action juste ne pouvait se réduire à l'application mécanique de règles, mais relevait d'une forme de prudence (*phronesis*), c'est-à-dire d'un discernement contextuel exercé dans des situations singulières et imparfaitement connaissables. Cette intuition demeure pleinement pertinente dans le contexte contemporain de la complexité forte, où l'ingénieur agit dans des systèmes marqués par l'interdépendance, la non-linéarité et l'émergence.

Dans les systèmes relevant de la complexité forte, les décisions sont prises dans un contexte d'incertitude irréductible. Les relations de causalité y sont partielles, évolutives et parfois opaques. Conséquemment, les effets des choix effectués peuvent se manifester de manière différée, indirecte ou non intentionnelle. L'ingénieur ne peut alors prétendre ni à une maîtrise complète du système, ni à une prévision exhaustive des conséquences de son action. Cette situation confère dès lors à l'éthique une place centrale, non comme un supplément normatif, mais comme une dimension constitutive de l'acte d'ingénierie.

L'éthique de l'ingénieur peut ainsi être définie comme la capacité à assumer une responsabilité élargie dans des situations où la décision ne peut être fondée exclusivement sur des critères techniques ou économiques. Elle implique la prise en compte explicite des incertitudes, des valeurs en jeu, des intérêts divergents des parties prenantes et

des effets potentiellement irréversibles des choix opérés. Dans un tel cadre, agir de manière responsable ne signifie pas éliminer le risque, mais reconnaître les limites de la connaissance, expliciter les hypothèses retenues et accepter la possibilité de l'erreur.

La complexité forte met également en évidence le caractère fondamentalement collectif de la décision éthique. Les systèmes sociotechniques contemporains associent une pluralité d'acteurs aux rationalités hétérogènes, dont aucun ne détient à lui seul une vision exhaustive du système. L'éthique de l'ingénieur ne peut donc se réduire à une posture individuelle. Elle doit s'inscrire, au contraire, dans des dispositifs de gouvernance, de délibération et de transparence permettant de confronter les points de vue, de rendre visibles les arbitrages et de construire une légitimité partagée des décisions.

Enfin, l'éthique de l'ingénierie, en contexte de complexité forte, invite à déplacer le regard de l'optimisation vers la soutenabilité et de la performance immédiate vers la robustesse et la résilience à long terme. Elle conduit à privilégier des choix réversibles, adaptatifs et ouverts à l'apprentissage, plutôt que des solutions maximisant localement l'efficacité au prix d'une fragilisation globale du système. Dans cette perspective, l'ingénieur ne se conçoit plus comme un simple expert chargé d'appliquer des solutions, mais comme un acteur responsable, participant à l'orientation des trajectoires sociotechniques dans un monde incertain.



## FOCUS

# Apprentissage interdisciplinaire, transdisciplinarité et complexité

L'appréhension de la complexité forte ne peut se satisfaire d'un regard disciplinaire isolé. Dans ce contexte, l'apprentissage interdisciplinaire apparaît comme une première réponse structurante, dès lors qu'il permet de croiser des cadres théoriques, des méthodes et des langages issus de disciplines différentes afin de mieux saisir les interactions, les dépendances et les effets de seuil qui échappent à une analyse fragmentée.

L'interdisciplinarité contribue ainsi à dépasser la juxtaposition des expertises. En confrontant les points de vue de l'ingénierie, des sciences humaines et sociales, des sciences de l'environnement ou de l'économie, elle met en lumière les tensions entre logiques techniques, contraintes organisationnelles, usages sociaux et finalités collectives. Elle révèle que la performance d'un système ne peut être évaluée uniquement à l'aune de critères internes, mais qu'elle dépend de conditions d'appropriation, de régulation et d'inscription territoriale plus larges. Cette mise en dialogue favorise une compréhension plus fine des boucles de rétroaction et des effets émergents propres à la complexité forte.

Toutefois, lorsque les enjeux excèdent non seulement les frontières disciplinaires mais aussi les cadres académiques eux-mêmes, une approche transdisciplinaire devient nécessaire. La transdisciplinarité ne vise pas seulement l'articulation des savoirs scientifiques entre

eux, mais leur confrontation avec d'autres formes de connaissances, comme les savoirs d'usage, les expériences professionnelles, les perspectives citoyennes ou les cadres normatifs. Elle reconnaît que, dans des situations marquées par une incertitude irréductible, aucune discipline ne peut prétendre à une vision exhaustive du système ni à la définition univoque d'une « bonne solution ».

Dans cette perspective, l'apprentissage transdisciplinaire contribue à transformer la posture de l'ingénieur. Il ne s'agit plus seulement de résoudre un problème donné, mais de participer à la construction collective de la question elle-même, en intégrant les valeurs, les controverses et les arbitrages qui structurent l'action. La complexité forte impose alors de penser la conception comme un processus ouvert, évolutif et situé, où la robustesse des décisions tient moins à leur optimalité théorique qu'à leur capacité à être discutées, ajustées et révisées dans le temps.

Ainsi, l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité ne constituent pas de simples compléments pédagogiques, ni des coquetteries discursives. Elles apparaissent comme des leviers essentiels pour former à une intelligence de la complexité, capable de relier, de contextualiser et de problématiser pour outiller l'action dans des systèmes où l'incertitude, l'émergence et les interactions multiples font partie intégrante du réel à transformer.

# 3. LA COMPLEXITÉ COMME PRINCIPE STRUCTURANT DES MISSIONS DE L'UTBM

Affirmer la complexité comme principe structurant de missions de l'UTBM revient à inscrire l'établissement dans une histoire longue de la formation technologique et de l'évolution des missions de l'enseignement supérieur. Les universités de technologie, apparues en France dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, se sont précisément construites en réponse à une première prise de conscience : celle de l'insuffisance d'une séparation stricte entre savoirs théoriques et pratiques industrielles, dans un monde technique de plus en plus sophistiqué.

Dès les années 1970, la création des universités de technologie<sup>10</sup> s'inscrit dans un contexte marqué par l'essor des systèmes industriels complexes, par la montée en puissance de l'automatisation et par les premières interrogations sur les limites du progrès technologique. Sans employer encore explicitement le vocabulaire de la complexité forte, ces établissements portaient déjà l'intuition que la formation de l'ingénieur devait articuler sciences fondamentales, ingénierie, sciences humaines et compréhension des systèmes sociotechniques. L'UTBM s'inscrit pleinement dans cet héritage, tout en l'actualisant face aux défis contemporains.

Aujourd'hui, pour l'ingénieur, la complexité ne se manifeste plus seulement dans les objets techniques eux-mêmes, mais dans les réseaux globaux dans lesquels ils s'insèrent. Les infrastructures énergétiques, les systèmes numériques, les chaînes de valeur industrielles et les dispositifs de mobilité constituent des ensembles hautement interdépendants, dont les défaillances locales peuvent produire des effets systémiques majeurs. Dans ce contexte, le rôle d'une université de technologie ne peut se limiter à

l'innovation technique. Il consiste également, et peut-être surtout, à produire des cadres d'intelligibilité et de discernement.

Sur le plan de la recherche, ce positionnement se traduit par une attention constante portée aux interfaces disciplinaires et aux objets hybrides. Les travaux menés à l'UTBM privilégient les approches intégratives, la modélisation systémique et l'analyse multi-échelles, afin de rendre compte des dynamiques globales des systèmes étudiés. Cette orientation permet de dépasser une logique d'accumulation de résultats spécialisés pour contribuer à une compréhension plus globale des enjeux techniques, environnementaux et sociétaux.

La formation, quant à elle, s'inscrit dans une continuité étroite avec cette vision de la recherche. Former à la complexité, c'est préparer les ingénieurs à exercer leur métier dans des contextes où les choix techniques sont indissociables de leurs implications économiques, sociales et environnementales. C'est aussi leur donner les moyens de dialoguer avec des acteurs aux rationalités diverses, de construire des compromis éclairés et d'assumer la responsabilité de décisions prises dans l'incertitude.

L'inscription territoriale de l'UTBM constitue un autre élément central de ce positionnement. Les territoires sont des systèmes complexes à part entière, où se rencontrent dynamiques industrielles, politiques publiques, infrastructures techniques et enjeux environnementaux. En s'ancrant dans son environnement régional, tout en participant à des réseaux nationaux et internationaux, l'UTBM joue un rôle de médiation entre savoirs académiques et réalités concrètes, contribuant ainsi

## EXEMPLE À L'UTBM

### Belfort e-START



Ce projet vise à faire du parc d'activités du Techn'Hom à Belfort un quartier pilote de la transition énergétique en France. Lauréat de l'appel à manifestation d'intérêt « Démonstrateurs de la ville durable » du plan France 2030, il est porté par le Grand Belfort, l'UTBM, Enedis et Tandem. L'objectif est de démontrer qu'un territoire peut produire, stocker, distribuer et consommer localement sa propre énergie renouvelable en combinant production photovoltaïque, solutions de stockage (batteries et hydrogène vert), rénovation énergétique des bâtiments et gestion énergétique intelligente. Ce modèle de communauté d'énergie renouvelable entend réduire les besoins énergétiques, maximiser l'autoconsommation et fournir une énergie verte à coûts maîtrisés à l'ensemble des acteurs présents (entreprises, université, services), tout en étant reproductible dans d'autres territoires.

Ce projet illustre une complexité dite forte car il ne se limite pas à une innovation technique isolée. Au contraire, il implique la coordination de multiples systèmes énergétiques, des mécanismes sophistiqués de stockage et de pilotage de l'énergie, une gouvernance partagée entre différents acteurs locaux, et des impacts sociaux et organisationnels profonds. Il combine ainsi des défis techniques, économiques, réglementaires et sociaux à l'échelle d'un quartier entier, ce qui nécessite une approche intégrée et transdisciplinaire pour réussir la transition vers une ville durable.

à l'élaboration de réponses adaptées aux enjeux locaux et globaux.

Penser la complexité comme principe institutionnel conduit également à interroger les modes de gouvernance universitaire. L'université est un système complexe, traversé par des logiques multiples, parfois contradictoires. Une approche systémique de la gouvernance vise non à simplifier artificiellement ces tensions, mais à les rendre intelligibles, à en organiser la régulation et à renforcer la capacité collective d'adaptation de l'institution. La robustesse institutionnelle devient ainsi un objectif stratégique de long terme.

Dans cette perspective, la sobriété technologique et organisationnelle apparaît comme une conséquence directe de la compréhension des systèmes complexes. Elle ne procède pas d'un renoncement, mais d'un

choix éclairé visant à concentrer les ressources là où elles produisent des effets durables, à éviter les dispositifs surdimensionnés et à privilégier des architectures soutenables dans le temps.

En définitive, en affirmant la complexité comme horizon, l'UTBM revendique une ambition profondément humaniste de l'ingénierie. Former à la pensée de la complexité, c'est préparer des professionnels capables de comprendre les systèmes qu'ils transforment, d'anticiper les conséquences de leurs décisions et d'assumer la responsabilité qui en découle. Dans un monde où les systèmes techniques influencent toujours plus profondément les conditions de la vie collective, cette capacité de discernement constitue, assurément, l'une des missions essentielles d'une université de technologie.

#### EXEMPLE À L'UTBM

### Territoire d'innovation



Le projet « Transformation d'un territoire industriel » s'inscrit dans le programme national Territoires d'Innovation qui vise à soutenir des démarches territoriales ambitieuses d'innovation et de développement soutenable. Ce projet est co-porté par Pays de Montbéliard Agglomération et Grand Belfort, avec l'appui de partenaires publics, entreprises et acteurs de la recherche, dont l'UTBM. Son ambition est d'accompagner la mutation socio-économique du Nord Franche-Comté vers une industrie plus verte, plus numérique et plus résiliente, en créant un écosystème d'innovation territorial autour des technologies propres, de l'industrie 4.0 et des interactions entre acteurs économiques et académiques. Ce projet relève d'une complexité dite forte car il combine des dimensions technologiques (innovation industrielle, technologies vertes et numériques), organisationnelles (coordination d'un large consortium d'acteurs publics, privés et scientifiques), économiques (restructuration et attractivité du tissu productif) et sociales (transition des emplois et montée en compétences). Sa mise en œuvre exige une intégration étroite de politiques publiques, de réseaux de recherche et de modalités de gouvernance partagée à l'échelle d'un territoire entier, face à des défis structurants de la transition industrielle et énergétique.

# NOTES

## 1

Étienne Bonnot de CONDILLAC (1715–1780) occupe une place singulière dans l'histoire des idées en tant que penseur de la genèse des systèmes de connaissance. Philosophe des Lumières, il développe une approche résolument empirique de l'intelligence humaine, qu'il conçoit non comme un ensemble de facultés données a priori, mais comme un système en construction progressive, issu de l'organisation et de l'interaction des sensations. Dans le *Traité des sensations* (1754), la célèbre métaphore de la statue illustre une intuition fondatrice. La complexité cognitive n'émerge pas par accumulation mécanique d'éléments simples, mais par structuration dynamique de relations entre ces éléments. Mémoire, jugement et raisonnement apparaissent ainsi comme des propriétés émergentes d'un système perceptif en évolution, annonçant une pensée relationnelle et processuelle qui rompt avec les modèles statiques du savoir.

Sans disposer des outils formels contemporains, CONDILLAC propose toutefois une vision de l'intelligence comme système adaptatif, sensible au contexte et irréductible à la somme de ses composants. À ce titre, son œuvre peut être perçue comme une contribution pionnière à une pensée de la complexité, attentive aux processus d'émergence, aux interactions et aux limites épistémiques de toute entreprise de connaissance.

### Pour aller plus loin...

- Condillac (1754). *Traité des sensations*. Vrin.
- Vermersch, Pierre (1994). *L'intelligence de l'action*. ESF.

## 2

Gaston BERGER (1896–1960) est l'une des figures majeures de la pensée française du XX<sup>e</sup> siècle, ayant contribué à renouveler en profondeur le rapport entre connaissance, action et avenir. Philosophe de formation, haut fonctionnaire et fondateur du Centre d'études prospectives, il est surtout connu pour avoir introduit en France une manière radicalement nouvelle de penser les systèmes sociaux, techniques et économiques dans leur dynamique temporelle.

La contribution centrale de BERGER réside dans l'élaboration de la prospective, conçue non comme un art de la prédiction, mais comme une démarche intellectuelle visant à éclairer l'action présente à partir de l'analyse structurée des futurs possibles. Cette approche repose sur une intuition fondamentalement systémique, celle que les phénomènes sociaux et techniques ne peuvent être compris isolément, mais uniquement comme des

ensembles d'interactions inscrits dans des trajectoires de long terme, traversés par des rétroactions, des effets de seuil et des bifurcations.

BERGER insiste sur la nécessité d'une pensée transversale, capable de dépasser les cloisonnements disciplinaires et les raisonnements linéaires. Il oppose à la logique de l'extrapolation mécanique une intelligence du devenir, attentive aux ruptures, aux irréversibilités et aux décisions structurantes. En ce sens, il anticipe les concepts contemporains de complexité forte, en reconnaissant l'existence d'une incertitude irréductible qui ne relève pas du hasard, mais des limites épistémiques de l'observateur et de l'action humaine.

### Pour aller plus loin...

- Berger, Gaston (1957). *Sciences humaines et prévision*. PUF.
- Godet, Michel (2007). *Manuel de prospective stratégique*. Dunod.

## 3

Ludwig von BERTALANFFY (1901-1972) est un biologiste et théoricien autrichien, considéré comme l'un des fondateurs de la pensée systémique moderne. Formé à la biologie théorique et à la philosophie des sciences, il a développé, dès les années 1930, une critique du réductionnisme mécaniste dominant, en particulier dans les sciences du vivant. Ses travaux culminent avec la formulation de la théorie générale des systèmes, dont l'ambition est de dégager des principes formels communs à des systèmes relevant de disciplines différentes, de la biologie à la sociologie, en passant par l'ingénierie.

La notion de système ouvert constitue l'un des concepts centraux de la pensée de von BERTALANFFY. Contrairement aux systèmes fermés de la thermodynamique classique, idéalisés comme n'échangeant ni matière ni énergie avec leur environnement, les systèmes ouverts se caractérisent par des échanges permanents de matière, d'énergie et d'information avec leur milieu. Cette ouverture n'est pas un détail périphérique, mais une condition structurante de leur organisation et de leur dynamique. Von BERTALANFFY montre que les systèmes ouverts peuvent maintenir des états stationnaires loin de l'équilibre thermodynamique, non par inertie, mais grâce à des flux continus qui compensent la tendance à l'entropie. Cette propriété permet de comprendre des phénomènes fondamentaux du vivant, tels que le métabolisme, la croissance, la régénération ou l'auto-régulation, qui

demeurent inintelligibles dans le cadre des modèles fermés. Le comportement du système ne peut dès lors être déduit de ses seules conditions initiales, mais dépend de la structure de ses échanges avec l'environnement. La notion de système ouvert implique également une causalité circulaire et à plusieurs niveaux. Ainsi, les contraintes globales du système influencent le comportement des composants, tandis que les interactions locales contribuent en retour à la stabilité ou à l'évolution de l'ensemble. En ce sens, von BERTALANFFY anticipe les notions contemporaines d'émergence, de régulation et de coévolution système-environnement. Le concept de système ouvert constitue ainsi un pilier fondamental de la systémique et des sciences de la complexité, en rompant avec une vision isolée, statique et strictement déterministe des systèmes naturels et artificiels.

#### **Pour aller plus loin...**

- von Bertalanffy, Ludwig (1968). *General System Theory*. George Braziller.
- Capra, Fritjof & Luisi, Pier Luigi (2014). *The Systems View of Life*. Cambridge University Press.

## **4**

Norbert WIENER (1894-1964) est un mathématicien et philosophe des sciences américain, professeur au Massachusetts Institute of Technology (MIT). Formé aussi bien aux mathématiques qu'à la philosophie, il est le fondateur de la cybernétique, discipline qu'il définit comme la science du contrôle et de la communication chez l'animal et la machine. Ses travaux, développés dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale et de l'essor des systèmes automatisés, ont profondément influencé les sciences de l'ingénieur, la biologie, les sciences cognitives et, plus largement, la pensée des systèmes complexes. Le principe de rétroaction (feedback) constitue le concept central de la cybernétique wienérienne. Il désigne le mécanisme par lequel une partie de la sortie d'un système est réinjectée en entrée, modifiant ainsi son comportement futur. Contrairement à la causalité linéaire classique, où une cause produit un effet sans retour, la rétroaction instaure une boucle causale fermée, dans laquelle l'effet agit en retour sur sa propre cause. WIENER distingue en particulier la rétroaction négative, qui tend à stabiliser le système autour d'un état de référence (comme dans les dispositifs de régulation thermique par exemple), et la rétroaction positive, qui amplifie les écarts et peut conduire à des

dynamiques d'emballement ou de rupture. Ce principe permet de penser conjointement information, régulation et finalité sans recourir à une téléologie externe. La stabilité ou l'instabilité d'un système ne résulte plus d'un équilibre statique, mais d'un ajustement dynamique permanent, dépendant de la circulation de l'information et des délais de réponse. La rétroaction devient ainsi un opérateur conceptuel essentiel pour comprendre l'adaptation, l'apprentissage et l'auto-régulation des systèmes, qu'ils soient techniques, biologiques ou sociaux. En introduisant la rétroaction comme catégorie scientifique fondamentale, WIENER rompt avec le paradigme mécaniste strict et ouvre la voie à une compréhension dynamique et relationnelle des systèmes. Cette notion constitue l'un des piliers de la systémique contemporaine et des sciences de la complexité, en rendant intelligibles les comportements non linéaires, les régimes oscillatoires et les phénomènes d'émergence qui caractérisent les systèmes complexes.

#### **Pour aller plus loin...**

- Wiener, Norbert (1948). *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press.
- Heims, Steve J. (1980). *John von Neumann and Norbert Wiener*. MIT Press.

## **5**

William Ross ASHBY (1903–1972) est un psychiatre et cybernéticien britannique, pionnier de la pensée systémique et de la cybernétique. Il est notamment connu pour la loi de la variété requise, principe fondamental de la régulation et de l'adaptation des systèmes complexes.

#### **Pour aller plus loin...**

- Ashby, W. Ross (1956). *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall.
- Conant, Roger & Ashby, W. R. (1970). *Every Good Regulator Must Be a Model of That System*. Int. Journal of Systems Science.

## 6

Stafford BEER (1926–2002) est un théoricien britannique de la cybernétique organisationnelle. Il a appliqué les principes de la systémique et de la régulation aux organisations complexes, notamment à travers le Viable System Model, visant à concevoir des systèmes capables de s'adapter durablement à des environnements changeants.

### Pour aller plus loin...

- Beer, Stafford (1972). *Brain of the Firm*. Allen Lane.
- Beer, Stafford (1985). *Diagnosing the System for Organizations*. Wiley.

## 7

Heinz von FOERSTER (1911–2002) est un physicien et cybernéticien d'origine autrichienne, figure centrale de la cybernétique de second ordre (c'est-à-dire une cybernétique qui intègre l'observateur dans le système observé). Il a mis en évidence le rôle de l'observateur dans la construction de la connaissance et a profondément influencé la pensée systémique et les approches contemporaines de la complexité.

### Pour aller plus loin...

- von Foerster, Heinz (1981). *Observing Systems*. Intersystems Publications.
- Segal, Lynn (2001). *The Dream of Reality: Heinz von Foerster's Constructivism*. Springer.

## 8

Gregory BATESON (1904–1980) est un anthropologue et épistémologue britannique, figure majeure de la pensée systémique et de l'écologie de l'esprit. Ses travaux ont mis en évidence le rôle des relations, des boucles de rétroaction et des niveaux logiques dans les systèmes vivants et sociaux, contribuant de manière décisive à la compréhension de la complexité et des processus d'apprentissage.

### Pour aller plus loin...

- Bateson, Gregory (1972). *Steps to an Ecology of Mind*. University of Chicago Press.
- Bateson, Gregory (1979). *Mind and Nature: A Necessary Unity*. Dutton.

## 9

C'est une approche intellectuelle héritée de René DESCARTES (1596-1650), fondée sur la décomposition des phénomènes complexes en éléments simples pour les étudier isolément, selon un principe de causalité linéaire et de clarté rationnelle.

### Pour aller plus loin...

- Descartes, René (1637). *Discours de la méthode*. Garnier-Flammarion.
- Morin, Edgar (1986). *La méthode Tome 3 : La connaissance de la connaissance*. Seuil.

## 10

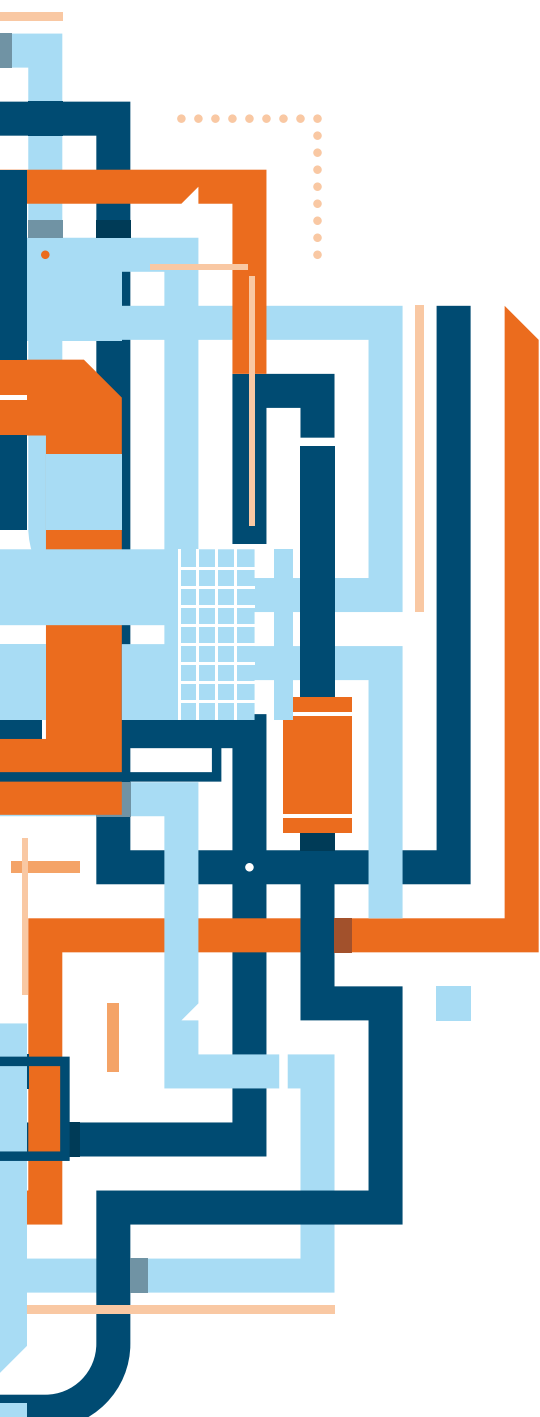
Guy DENIELOU (1923–2014) est un ingénieur, officier de marine et universitaire français, connu comme le fondateur de l'Université de technologie de Compiègne (UTC). Après une carrière scientifique au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), où il dirigea notamment la conception du réacteur à neutrons rapides Phénix, il quitta le CEA en 1972 pour créer une nouvelle forme d'enseignement supérieur en France. DENIELOU fut directeur de l'UTC de 1974 à 1987, période pendant laquelle il posa les fondements d'un modèle éducatif novateur associant étroitement enseignement, recherche et industrie et reconnaissant la technologie non seulement comme application technique mais comme discipline à part entière. Sa définition de la technologie (« le nom que prend la science quand elle a pour objet les produits et les procédés de l'industrie humaine ») illustre sa vision intégrative de la formation d'ingénieur.

Le modèle des universités de technologie, conçu par DENIELOU à l'orée des années 1970, était hétérodoxe car il rompait avec les structures traditionnelles de l'enseignement supérieur français. Il ne s'agissait ni d'une université classique centrée sur l'abstraction scientifique, ni d'une grande école d'ingénieurs cloisonnée dans la technicité, mais d'un « troisième modèle », articulant formation académique, insertion dans le monde industriel et ouverture internationale. Il introduisait des stages obligatoires en entreprise, une liaison permanente entre recherche, enseignement et monde socio-économique, ainsi qu'une gouvernance impliquant des partenaires industriels dans les conseils stratégiques, des caractéristiques qui, pour l'époque, étaient très peu répandues en France. Cette approche anticipait les besoins futurs de sociétés où la technologie devait être pensée de façon systémique, en lien avec les acteurs économiques et sociaux, bien avant que ces notions ne deviennent des paradigmes éducatifs plus largement reconnus.

### Pour aller plus loin...

- Histoire de l'UTC, site officiel de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), « Guy Deniérou, fondateur de l'UTC ».





UNIVERSITÉ  
MARIE & LOUIS  
PASTEUR

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD  
90010 Belfort cedex - Tél. +33 (0)3 84 58 30 00 - Fax +33 (0)3 84 58 30 30 - [www.utbm.fr](http://www.utbm.fr)

UTBM  
POWERED BY  
TECHNO  
LOGY

utbm communication - 02/2026 - Illustrations : FREEPIK.COM / UTBM - schémas intégrant des éléments générés par intelligence artificielle

