



HAL
open science

Sciences de l'ingénieur et génies techniques : Quelles perspectives pour la recherche, quelles formations à l'ENS de Cachan ?

Virginie Albe, Laurent Champaney, François Costa, Michaël Huchette

► To cite this version:

Virginie Albe, Laurent Champaney, François Costa, Michaël Huchette. Sciences de l'ingénieur et génies techniques : Quelles perspectives pour la recherche, quelles formations à l'ENS de Cachan ?. L'ENS Cachan : Le siècle d'une grande école pour les sciences, les techniques, la société, 2013. hal-03013836

HAL Id: hal-03013836

<https://hal.science/hal-03013836v1>

Submitted on 19 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Préimpression du chapitre d'ouvrage :

Virginie Albe, Laurent Champaney, François Costa, Michaël Huchette (2013). *Sciences de l'ingénieur et génies techniques. Quelles perspectives pour la recherche, quelles formations à l'ENS de Cachan ?* In Florent Lebot, Virginie Albe, Gérard Bodé et Elisabeth Chatel, *L'ENS Cachan : Le siècle d'une grande école pour les sciences, les techniques, la société* (pp. 217-228). Rennes : PUR.

<http://www.pur-editions.fr/detail.php?idOuv=3311>

Sciences de l'ingénieur et génies techniques **Quelles perspectives pour la recherche, quelles formations à l'ENS de Cachan ?**

Virginie ALBE, Laurent CHAMPANEY, François COSTA, Michaël HUCHETTE

L'ENS de Cachan, pour laquelle les domaines technologiques industriels étaient des fers de lance à ses débuts, compte encore aujourd'hui en son sein plus de 600 étudiants et normaliens (années L3, M1, M2) dans les domaines des Génies pour l'enseignement et pour la recherche : génie électrique, génie mécanique et génie civil (désormais désignés dans cette contribution sous le terme générique *sciences pour l'ingénieur*). Ce chapitre considère les orientations de formation à l'ENS de Cachan dans ces domaines lors des vingt dernières années et dans une vision prospective à l'horizon 2030. Il rend compte de réflexions initiées dans le cadre de l'atelier PREA2K30¹ qui s'est tenu en 2010-2011 pour le compte de l'Agence Nationale de la Recherche.

Cet atelier avait pour objectif d'identifier et de préciser les problématiques majeures dans les vingt prochaines années relativement aux connaissances et outils clés pour l'apprentissage et l'enseignement, en tenant compte de leurs dimensions économiques, industrielles et sociales. Dans le cadre de cette action cinq chercheurs du laboratoire STEF, ont conduit des entretiens auprès de seize enseignants-chercheurs de l'ENS de Cachan, majoritairement des directeurs de département ou de laboratoire², afin d'identifier les enjeux de savoirs, tant du point de vue de la recherche que de la formation, sur la période 1970-2010, et de tenter de tracer d'éventuelles périodisations et tendances s'y rapportant. L'hypothèse qui sous-tend la démarche est qu'une entrée par les questions de formation permet de contribuer à la compréhension des configurations et reconfigurations de domaines de recherche, dans la mesure où en formation se donnent à voir les éléments essentiels d'une acculturation aux pratiques professionnelles visées, ici celles de la recherche. Dans ce texte nous limitons notre analyse aux domaines des *sciences pour l'ingénieur* et nous nous appuyons uniquement sur les entretiens menés avec cinq personnes en responsabilité dans les départements et

¹ G.-L. BARON et J.-M. BURKHARDT, « Éducation, formation et apprentissages à l'horizon 2030 : éléments issus d'un atelier de prospective pour la recherche », *STICEF*, 18, 2011 (mis en ligne le 13/03/2012, <http://sticef.org>).

² Les entretiens ont eu lieu entre octobre 2010 et octobre 2011, dans les locaux de l'ENS de Cachan. Les personnes interrogées sont : DENIS Bruno (enseignant au département Génie mécanique, chercheur au LURPA), RAGUENEAU Frédéric (directeur du département Génie civil, chercheur au LMT), COSTA François (chercheur au SATIE), CHAMPANEY Laurent (directeur du département Génie mécanique, chercheur au LMT) et GABSI Mohamed (directeur du département EEA, chercheur au SATIE) interrogés par Michaël HUCHETTE ; ZALIO Pierre Paul (directeur du département Sciences sociales, chercheur à l'IDHE), NAKATANI Keirato (enseignant au département Chimie, directeur du laboratoire PPSM), SABER Antony (directeur du département de Langues) et DELEPORTE Emmanuelle (directrice du département de Physique, chercheuse au LPQM et à l'IdA) interrogés par Virginie ALBE ; PASCAL Frédéric (enseignant au département de mathématiques, directeur du CMLA), FONTAINE Philippe (enseignant au département Economie gestion, directeur du laboratoire H2S), SÉPARI Sabine (directrice du département Economie gestion), BASTARD Benoît (directeur de recherche à l'ISP) et COLIGNON Baudouin (directeur du département Design), interrogés par Eric BRUILLARD ; AUCLAIR Christian (directeur du département Biologie génie biologique et chercheur au LBPA) et OUAKNINE Robert (conseiller en formation continue, service Formation Continue et Développement), interrogés par Maryline COQUIDÉ et Stanislas DOREY.

laboratoires des domaines des génies identifiés plus haut. Ces entretiens ont trouvé un écho particulier auprès des responsables de département car une réflexion était en cours à propos de la conception d'une nouvelle maquette de formation L3 commune aux trois départements de génie mécanique, génie civil et de génie électrique. Les réflexions présentées ci-dessous dépassent le cadre strict des entretiens, qui se sont prolongés par des échanges entre les protagonistes et des comparaisons avec les autres disciplines.

Notre objectif dans ce chapitre est de caractériser les évolutions récentes et en cours dans le champ de recherche des sciences pour l'ingénieur à l'ENS de Cachan du point de vue des chercheurs qui y sont impliqués, et d'en dégager des implications pour la formation.

Nous montrons d'abord que les sciences pour l'ingénieur ont une identité multiple au sein de l'ENS de Cachan et que cette identité est actuellement questionnée.

Quelles sont les évolutions actuelles des problématiques et des connaissances dans ce domaine de recherche ? Quelles seront les problématiques d'avenir ? A ces questions nous apportons des éléments de réponse dans les deux paragraphes suivants en dégageant les changements importants concernant les compétences mobilisées par les chercheurs, qui remettent en question la conception des connaissances fondamentales à aborder en formation à la recherche.

Nous dessinons en synthèse la figure dominante du chercheur en sciences pour l'ingénieur à l'ENS de Cachan. Nous montrons comment elle se concrétise depuis septembre 2011 dans la nouvelle formation de Licence SAPHIRE (L3) commune aux trois départements d'enseignement.

Les sciences pour l'ingénieur à l'ENS de Cachan : de quoi parle-t-on ?

Dans les champs qui nous intéressent ici, l'ENS de Cachan compte trois départements d'enseignement – Génie mécanique ; Génie civil ; Electronique, Electrotechnique, Automatique (EEA) – qui prennent en charge des formations de L3, M1 et M2.

Elle comprend également trois laboratoires. Le Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT) développe des recherches sur la modélisation des solides et des structures : mécanique des matériaux, mécanique expérimentale, simulation numérique et calcul haute performance. Le Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) développe des recherches sur la maîtrise de la qualité géométrique des pièces et des mécanismes et sur l'ingénierie des systèmes automatisés. Enfin, le laboratoire des Systèmes et Applications des technologies de l'Information et de l'Energie (SATIE) développe des recherches sur la modélisation, la conception et l'optimisation des composants et systèmes pour l'énergie électrique et le traitement de l'information.

Il est à noter que les trois domaines disciplinaires identifiés en introduction (génie mécanique, génie civil, génie électrique) sont distincts parce qu'ils correspondaient jusqu'en 2012 à des agrégations différentes (mécanique, génie mécanique, génie électrique et génie civil) qui correspondaient aussi à des disciplines scolaires du second degré et à des spécialités de baccalauréat technologique, de DUT et de BTS. Les réformes récentes et actuelles qui fusionnent les spécialités de baccalauréat technologique (pour donner la nouvelle spécialité STI2D) et les spécialités d'agrégation (pour donner l'unique spécialité Sciences Industrielles de l'Ingénieur) remettent en question cette distinction disciplinaire ou tout du moins soulèvent de nouvelles questions de relations entre ces domaines. La perméabilité entre ces trois champs disciplinaires se marque à l'ENS par l'appartenance des enseignants chercheurs d'un même département à des laboratoires différents et par la diversité des domaines d'application des recherches entreprises dans ces laboratoires. Et, nous le verrons plus loin, la question de la

spécialisation des formations et celle des enseignements transversaux dans la formation est au cœur des problématiques actuelles à l'ENS.

Une des spécificités des laboratoires de recherche en sciences pour l'ingénieur est qu'ils sont fortement liés aux grandes entreprises industrielles qui ont les moyens de financer des collaborations de recherche académique : automobile, aéronautique, aérospatial, ferroviaire, armement, production d'énergie électrique, télécommunications, bâtiment et travaux publics. Les problématiques de recherche trouvent en général leur origine dans des problématiques d'ingénierie de conception de produits et de recherche-développement.

Par ailleurs, pour les enseignants chercheurs avec lesquels nous nous sommes entretenus, parler de formation à l'ENS consiste pour l'essentiel à parler de formation au métier de chercheur, à la recherche académique de pointe. La dimension *formation à l'enseignement* a été absente de nos échanges. Par exemple la formation de préparation à l'agrégation a très peu été abordée. On peut l'expliquer de différentes manières. La première est que les entretiens commençaient par des questions portant sur l'évolution du domaine de recherche de l'enseignant chercheur questionné et se poursuivaient par des questions sur les problématiques de formation, donc peut-être comprises comme conséquentes des premières. Une autre explication possible est que, depuis une quinzaine d'années, la mission prioritaire de l'ENS de Cachan est devenue la recherche et la formation à la recherche, et non plus la formation des enseignants du second degré comme cela a pu l'être. Cela est concomitant avec la baisse drastique du nombre de postes aux agrégations, devenus inférieurs aux nombres de normaliens.

Nouvelles problématiques, nouvelles compétences de recherche

Une première série d'évolutions des problématiques de recherche en mécanique et en électronique convergent vers la nécessité d'une maîtrise pointue des théories physiques fondamentales et des mathématiques.

Dans le domaine de la mécanique, « les avancées futures dans la prédiction des comportements sont dans les couplages de modèles. Les modèles et simulateurs numériques de phénomènes uniques sont assez performants aujourd'hui, mais on peut améliorer la prédiction des comportements des systèmes où plusieurs phénomènes sont en jeu et couplés »³. Par exemple des recherches sont en cours afin d'optimiser les outils numériques de simulation des phénomènes multiples en jeu dans le comportement d'un frein de voiture, destinés aux bureaux d'études des constructeurs automobiles. En effet les phénomènes physiques opérant dans un système de frein à disque sont liés à de fortes amplitudes de température, des gradients thermiques élevés, des déformations des pièces, le frottement du disque sur les plaquettes, etc. Les différents phénomènes s'avèrent interdépendants (couplages thermomécaniques dans ce cas). En électronique aussi des recherches en cours consistent à coupler deux outils de simulation chacun étant initialement conçu pour prendre en compte un phénomène unique. « Par exemple on veut pouvoir simuler simultanément le fonctionnement d'un circuit électronique et le comportement thermique en trois dimensions d'un composant du même circuit »⁴. Les compétences mobilisées dans ce type de travaux ne sont pas celles de chercheurs généralistes, mais plutôt celles de spécialistes capables de dialoguer avec d'autres et de collaborer pour élaborer de nouveaux modèles couplés. Et cela nécessite d'être capable de spécifier très précisément ses hypothèses, en maîtrisant mieux qu'auparavant les connaissances de base des phénomènes physiques concernés par les couplages en jeu.

³ Extrait de l'entretien de Laurent CHAMPANEY réalisé par Michaël HUCHETTE dans les locaux du département Génie mécanique le 30 novembre 2010.

⁴ Extrait de l'entretien de François COSTA réalisé par Michaël HUCHETTE dans les locaux du laboratoire SATIE le 8 octobre 2010.

Par ailleurs, les thématiques de recherche en électronique changent. En effet, depuis vingt ans elles concernaient essentiellement les fonctions intégrées analogiques et/ou numériques et les associations de composants élémentaires en vue d'élaborer des fonctions complexes et performantes ; il n'était pas nécessaire de s'intéresser aux phénomènes physiques à l'échelle de l'atome. Les nouvelles applications et les nouveaux domaines de recherche (spintronique⁵, nanoélectronique) sur les composants sans cesse plus microscopiques font appel à des fondamentaux de physique et de chimie : physique quantique pour les nanotechnologies et la nanoélectronique, électrochimie dans les énergies renouvelables, physique des interfaces pour les cellules photovoltaïques, mécanique des fluides pour les éoliennes, interface biologie/physique pour les biotechnologies⁶. Les laboratoires attendent d'un chercheur qu'il ait des connaissances de base larges qui permettent de comprendre les couplages, mais aussi qu'il ait des connaissances pointues dans son champ spécifique : ainsi par exemple, un spécialiste de la conception en électronique de puissance devra posséder de bonnes bases en physique des semi-conducteurs, en thermomécanique et en électromagnétisme.

Une deuxième série d'évolutions concerne la recherche de nouveaux équilibres entre simulation numérique et expérimentation dans le développement de modèles fiables des fonctionnements des composants et des systèmes. En effet l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs et l'essor des méthodes numériques ont permis des développements importants en termes de modélisation et simulation informatiques. Mais la réalité à simuler est toujours plus complexe et les modèles posent des problèmes de fiabilité. C'est pourquoi la recherche développe des méthodes mixtes articulant des méthodes d'investigation des composants techniques en laboratoire et des méthodes de simulation de leurs comportements. C'est aussi la raison pour laquelle de nouvelles recherches portent spécifiquement sur le développement de méthodes expérimentales de validation des modèles mobilisés dans les simulations numériques.

Ainsi, en électronique de puissance, les chercheurs développent des démarches pour aller du composant électronique (objet technique) à sa physique fine, intégrant de manière complémentaire expérimentation en laboratoire et développement de modèles. Par exemple, dans le domaine ferroviaire s'est posé le problème de la fiabilité des semi-conducteurs de puissance qui sont au cœur de la gestion de l'énergie pour la traction électrique. La « casse » de ces composants soumis à des cycles thermiques occasionne des pertes d'exploitation importantes. Il est donc nécessaire pour la maintenance préventive de connaître parfaitement leur durée de vie et leur fiabilité lorsqu'ils sont soumis à des contraintes thermo-électromécaniques réelles. La démarche de recherche utilisée au laboratoire SATIE (Systèmes et Applications des technologies de l'Information et de l'Energie) peut être décomposée en quatre phases. La première a consisté à reproduire en laboratoire le fonctionnement en service des composants étudiés ; mesurer ses comportements thermiques, mécaniques et électriques ; analyser par l'observation les défaillances du composant. En plus des mesures électriques classiques, divers instruments de caractérisation physico-chimique sont aussi utilisés, comme la caméra thermique, le microscope électronique à balayage, l'analyse par rayon X, etc. Ici sont nécessaires à la fois une compétence de spécialiste pointu (le semi-conducteur de

⁵ La technologie électronique actuelle repose sur une propriété essentielle de l'électron, sa charge électrique. Avec le développement poussé de la technique du silicium, la gravure des circuits intégrés va atteindre une limite physique de miniaturisation. La *spintronique* repose (dans les développements actuels) sur la technique du silicium, bien maîtrisée, mais permet d'exploiter une propriété supplémentaire de l'électron, la propriété quantique de spin. L'enjeu technologique est de contrôler et détecter cet état quantique (positif ou négatif) afin de l'utiliser comme moyen d'enregistrer de l'information dans des dimensions bien inférieures à celle de l'électronique traditionnelle.

⁶ Source : entretien de Mohamed GABSI réalisé par Michaël HUCHETTE dans les locaux du département EEA le 7 décembre 2010.

puissance correspond au domaine de l'électronique) et des connaissances élargies à la mécanique de l'endommagement des matériaux. La deuxième phase a été l'élaboration de nouveaux modèles d'endommagement couplant différents modèles physiques mécaniques, thermiques et électriques. Ensuite il a fallu valider ces nouveaux modèles par une approche soit analytique, soit numérique (ou mixte). Enfin les chercheurs ont fait fonctionner ces modèles sur des propositions d'évolution du composant soit pour évaluer leur durée de vie avant défaillance, soit pour préconiser des solutions techniques pour une conception plus fiables.

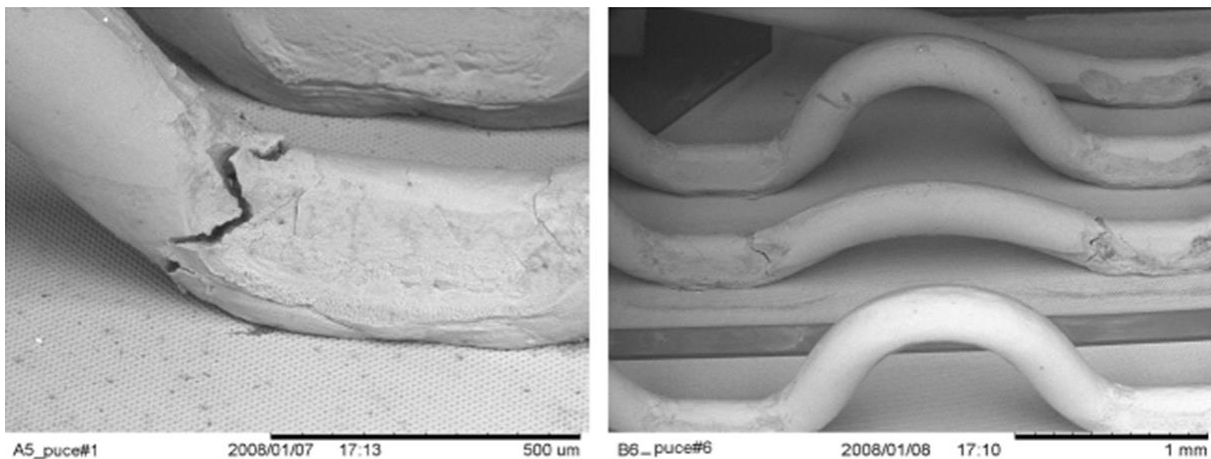


Figure 1 : Vue au microscope électronique à balayage de fissures sur un composant semi-conducteur de puissance utilisé pour le pilotage de moteurs électriques pour les transports ferroviaires (Source SATIE)

En mécanique, depuis vingt ans, beaucoup de travaux se sont développés sur la simulation numérique des comportements et ces travaux ont pris le pas sur l'expérimentation, coûteuse, laissée de côté par la recherche. « Ainsi, une multitude de modèles ont été développés. Mais depuis environ cinq ans on atteint un écueil : on ne connaît pas la validité des modèles développés, le retour à la réalité n'est pas fait, et ce n'est pas simple car les modèles sont de plus en plus fins »⁷.

L'expérimentation revient donc progressivement à niveau pour la validation des modèles. Mais très peu de laboratoires français ont maintenu des compétences et des moyens techniques et humains en expérimentation. Ce constat est vrai pour des applications de génie civil, mais aussi pour les matériaux composites pour l'aéronautique. Quelques laboratoires font exception tels que le Laboratoire de Mécanique et Technologie de l'ENS de Cachan (LMT), qui est connu pour cela au niveau international. Il se développe dans ce sens et une grosse partie de ses financements est utilisé pour l'équipement de ses plateformes techniques. « Les recherches sur la validation des modèles développent des environnements expérimentaux les plus réalistes en termes de conditions limites, de sollicitations multi physiques, de taille, de temps. On cherche ainsi à développer des méthodes expérimentales *temps réel* : les sollicitations imposées sont dynamiques, avec des variations très proches des sollicitations réelles, avec des instruments permettant une mesure de ces variations rapides en temps réel, avec une chaîne d'acquisition de mesure et d'analyse de ces données suffisamment rapide pour permettre une analyse en temps réel et un asservissement des sollicitations imposées en fonction des mesures faites »⁸. Mais les recherches que ce *temps*

⁷ Extrait de l'entretien de Frédéric RAGUENEAU réalisé par Michaël HUCHETTE dans les locaux du département Génie civil le 10 janvier 2011.

⁸ *Ibid.*

réel doit permettre sont aujourd'hui limitées par un verrou technologique : les techniques numériques ne sont pas suffisamment avancées pour atteindre un temps de réaction suffisamment petit, de l'ordre de la milliseconde, de la chaîne d'acquisition. Les développements en cours devraient lever ce verrou vers 2015 et les modèles développés en ce moment sont conçus pour pouvoir fonctionner avec ces développements numériques futurs.

Nous l'avons vu, autant en électronique qu'en mécanique, des questions nouvelles de modélisation mettent en mouvement la recherche en sciences pour l'ingénieur. Et les chercheurs doivent mobiliser et maîtriser plus que jamais les fondements théoriques de leurs modèles et, malgré les progrès de la simulation numérique, des compétences pour l'investigation expérimentale des composants techniques et la validation expérimentale des modèles.

Quelles avancées futures ?

Outre les évolutions récentes et en cours évoquées ci-dessus, les chercheurs en sciences pour l'ingénieur interrogés ont énoncé des problématiques qui nécessitent des avancées scientifiques futures. Nous en citons dans ce paragraphe les deux principales, qui sont encore des problèmes de modélisation : la problématique des changements d'échelles et celle de la maîtrise des incertitudes.

La modélisation d'un système complexe, tel un véhicule automobile entier, pose des problèmes particuliers de changement d'échelles. Un système est décomposé en sous-systèmes, eux même décomposés en sous-systèmes. En ingénierie électrique, un véhicule peut être décomposé avec cinq niveaux fonctionnels de sous-systèmes (voir encadré).

- Niveau 1 : le véhicule entier vu dans sa globalité et ses fonctions d'utilisation ;
- Les sous-systèmes de niveau 2 : réseau de bord 14 volts, réseau haute tension, chaîne de traction, système de recharge des batteries, ... interconnectés par des faisceaux de câbles ;
- Les sous-systèmes de niveau 3, par exemple pour la chaîne de traction : onduleur, batterie, câbles, machine, ... interconnectés par des jeux de barres, des bus et des câbles ;
- Les sous-systèmes de niveau 4, par exemple pour l'onduleur : cellule de commutation, convertisseurs DC-DC, onduleur, ... interconnectés par des circuits imprimés ;
- Les sous-systèmes de niveau 5, par exemple pour le convertisseur DC-DC : composants magnétiques, interrupteurs de puissance, ...

Encadré 1 : Les cinq niveaux fonctionnels de décomposition d'un véhicule automobile en ingénierie électrique

A chacun de ces niveaux, les constantes de temps des phénomènes en jeu sont très différentes : de quelques dizaines de secondes à l'échelon le plus élevé jusqu'à la dizaine de nanosecondes au niveau le plus profond. Ceci pose de redoutables problèmes en termes de modèles et de temps de calcul. Ainsi, à chaque niveau de sous-système, les ingénieurs de bureaux d'études sont amenés à utiliser des outils de simulation spécifiques à ce niveau adaptés à la dynamique des phénomènes électriques à simuler, à leur temporalité. Comment les simulations à un niveau donné peuvent-elles renseigner les simulations à un niveau supérieur ? Comment les outils de simulation de différents niveaux peuvent-ils communiquer entre eux ? Des recherches actuelles et à venir tentent d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

De même, concernant l'expérimentation (évoquée plus haut) pour la validation des modèles en mécanique, auparavant les chercheurs investiguaient au niveau du *volume élémentaire représentatif* du matériau, maintenant ils descendent au LMT à une échelle plus petite jusqu'à la physique du matériau grâce au microscope électronique à balayage, et à l'opposé ils montent à l'échelle d'une structure grâce aux plateformes d'essai. Cette plage d'échelles va encore s'élargir avec les partenaires du plateau de Saclay : le CEA dispose des moyens pour aller à des échelles encore plus petites (grâce au synchrotron), et plus grandes (structures de bâtiment à l'échelle 1). Des recherches en cours ont pour objectif de produire des connaissances sur les changements d'échelle et les passages d'échelle pour la validation expérimentale des modèles.⁹

Enfin la maîtrise des incertitudes émerge comme un nouveau champ commun de recherche. En effet, quel que soit le domaine, la prise en compte des incertitudes de modélisation dans la simulation est de plus en plus présente. Les rapides avancées de ces vingt dernières années dans le domaine de la simulation numérique associées à la puissance toujours croissante des calculateurs nous ont conduits à un point où la pertinence des résultats de simulation est essentiellement limitée par les incertitudes sur les paramètres matériaux, les dimensions (spécialité du Laboratoire universitaire de recherche en production automatisée -LURPA), les chargements et les conditions aux limites. La réponse du modèle ne peut plus être déterministe : elle doit inclure ces incertitudes de manière toujours plus fine. Cet état de fait conduit à l'introduction de plus d'outils mathématiques pour la description des données incertaines, pour la propagation des incertitudes à travers des modèles complexes éventuellement couplés et pour la description des résultats. La nécessité de maîtriser les incertitudes sur les données resserre encore plus les liens entre expérimentation et simulation, en particulier pour tout ce qui touche à la mesure.

Quelle formation initiale pour quels chercheurs ?

En revenant avec les acteurs de la recherche en sciences pour l'ingénieur sur les évolutions de leur champ, nous voyons apparaître certains traits communs à la figure du chercheur dans les différents laboratoires. Les nouvelles thématiques font appel à des connaissances scientifiques théoriques pointues et diverses ; elles nécessitent des couplages de modèles et la collaboration de chercheurs dans différents domaines, capables de discuter ensemble de leurs différents modèles ; elles nécessitent des expérimentations plus poussées et plus élaborées pour la validation des modèles et une connaissance fine des modèles et de leurs incertitudes ; elles mobilisent la connaissance des principes de simulation et des méthodes numériques employées.

La figure dominante du chercheur en sciences pour l'ingénieur à l'ENS de Cachan aujourd'hui peut se synthétiser dans la formule : *le spécialiste communicant*.

Il est *spécialiste* : il connaît les problèmes d'ingénierie courants et les solutions techniques dans son domaine ; il maîtrise de manière approfondie les modèles et leurs fondements théoriques (physique, chimie) utilisés pour l'analyse des composants et systèmes dans son domaine ; il maîtrise des savoirs et techniques d'une part pour l'expérimentation, d'autre part pour la modélisation numérique.

Il est *communicant* dans la mesure où il est capable de communiquer avec d'autres spécialistes, c'est à dire à formaliser ses modèles et leurs fondements théoriques, ses hypothèses et ses problématiques et à comprendre celles des autres spécialistes.

⁹ *Ibid.*

Aussi la convergence des besoins de formation dans les différentes spécialités de recherche en sciences pour l'ingénieur et l'importance accordée à certains fondamentaux est-elle à l'origine d'une réflexion sur la formation des étudiants dès la première année à l'ENS, en L3, pour les préparer à leur entrée en master puis à devenir chercheurs. Elle se concrétise depuis la rentrée de septembre 2011 par une formation L3 commune aux trois départements (Génie mécanique, Génie civil, EEA) dénommée SAPHIRE (Sciences Appliquées à la PHysique et à l'Ingénierie pour la Recherche et l'Enseignement) où les enseignements qui sont considérés comme fondamentaux ont plus de place et où la spécialisation se fait progressivement avec un tronc commun important, des enseignements d'orientation puis de spécialité. Ces fondamentaux apparaissant dans la maquette de formation concernent les traits communs des chercheurs identifiés précédemment : fondements théoriques pour la modélisation (mathématiques, statistiques et probabilités, milieux continus, matériaux, mécanique quantique, énergie, électromagnétique) ; savoirs pour l'expérimentation (traitement du signal, techniques expérimentales) ; savoirs pour la modélisation numérique (méthodes numériques) ; méthodes d'analyse et d'interprétation des données issues de simulateurs numériques. Le lien avec l'expérimentation reste indissociable.

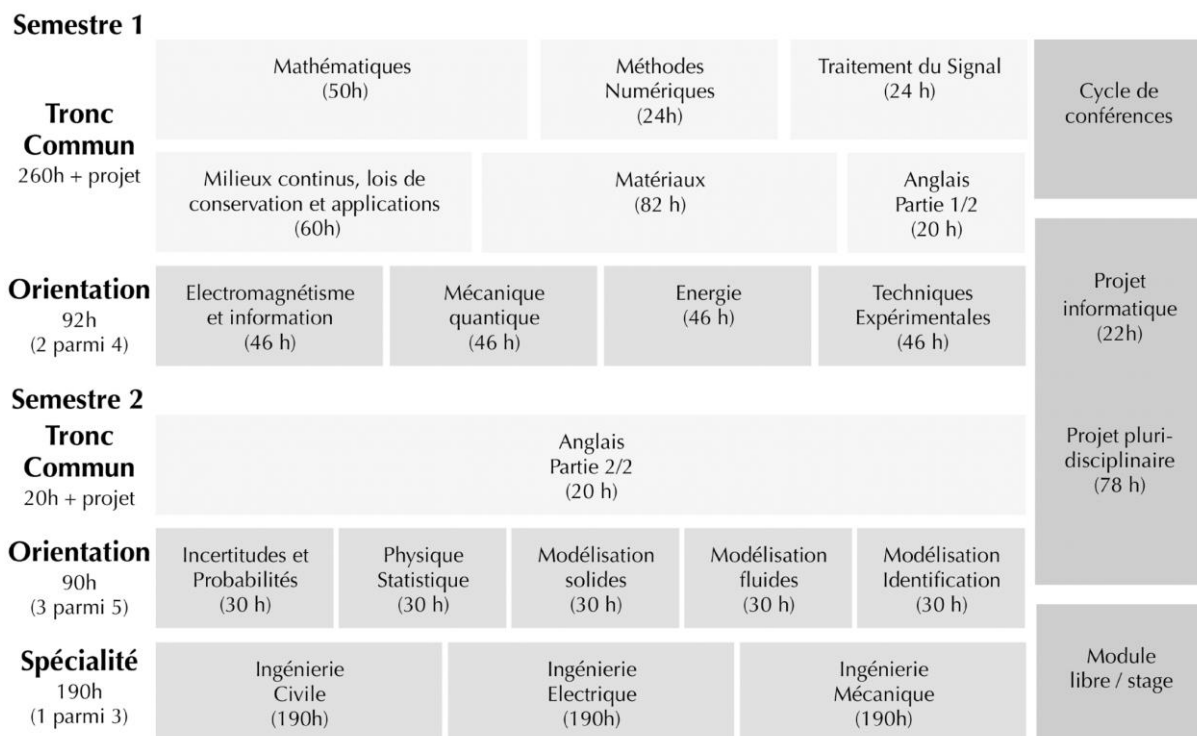


Figure 2 : Schéma synoptique de la maquette de formation de la L3 SAPHIRE commune aux départements génie mécanique, génie civil et EEA (2012-2013)

Concernant l'année de L3, notons que la première année d'une école comme l'ENS sert aussi de mise à niveau en fonction de l'origine des élèves. Pour certains, les techniques d'apprentissage par problèmes (qui justifient le besoin d'apprentissages théoriques par la nécessité de résoudre un problème pratique) se révèlent utiles. Notons aussi la place de plus en plus importante des projets : apprentissage par projets dont projets pluridisciplinaires. Enfin, remarquons que les disciplines de Sciences de l'Ingénieur restent liées aux applications industrielles. Leur maîtrise nécessite une dose importante de pratique qui permet d'appréhender les relations entre le réel et le modèle.

La mise en place de cette formation, vécue comme une fusion des sections historique B1 (Mécanique), B2 (Génie civil), B3 (Génie mécanique), B4 (Génie électrique) et A'2 (Physique appliquée) ne s'est pas fait sans heurts et le processus de mise en place de la maquette a été complexe. La nécessité d'introduire plus d'interaction entre les disciplines a tout de même pris le pas sur la défense des disciplines de chacun. Le résultat est une évolution notable de la formation à l'ENS de Cachan. Les premiers étudiants qui ont traversé cette première année semblent satisfaits de cette ouverture d'esprit. Il est à noter que les interactions nécessaires entre les enseignants des différents départements pour la mise en œuvre de la maquette ont été le catalyseur du démarrage de nouvelles opérations de recherche transverses entre les laboratoires.

Conclusion

Le choix qui sous-tendait notre démarche est qu'une entrée par les questions de formation permet de contribuer à la compréhension des configurations de domaines de recherche, dans la mesure où en formation se donnent à voir les éléments essentiels d'une acculturation aux pratiques professionnelles visées, ici celles de la recherche. Nous avons identifié à partir des entretiens menés un mouvement de retour dans la période récente vers des essais expérimentaux en contrepartie du développement de nombreuses modélisations depuis vingt ans et leur implémentation numérique. À l'inverse pour comprendre les enjeux des transformations actuelles des formations (telles que la formation de licence SAPHIRE), il est nécessaire de comprendre les évolutions dans les champs de recherche correspondants.

Les éléments apportés dans ce chapitre concernent les recherches et les formations dans le domaine des sciences pour l'ingénieur à l'ENS de Cachan, qui ne sont peut-être pas représentatives d'une évolution plus large des sciences pour l'ingénieur en France et à ailleurs. Par ailleurs nous n'avons que touché du doigt la question des implications en formation et en recherche des mutations actuelles des secteurs industriels sur le territoire national, mais elle se pose plus largement : modalités d'innovation (sous-traitance de la recherche-développement), perspectives d'emploi dans les domaines de la production industrielle et de la conception industrielle, etc.

Concernant les génies techniques et les sciences pour l'ingénieur, il apparaît un éloignement important entre d'une part disciplines de recherche (spécialisées) et d'autre part agrégations et disciplines d'enseignement pour l'Éducation nationale (de plus en plus généralistes). Nous y voyons une rupture historique de la double mission de l'ENS de Cachan de former à la recherche et à l'enseignement secondaire.