



*Ce rapport de prospective est dédié à notre collègue et amie Isabelle Tellier qui nous a quittée au cours de son mandat au sein du conseil*

# Rapport de Prospective du Conseil Scientifique de l'Institut des Sciences de l'Information et leurs Interactions (INS2I)

Christian BARILLOT *Président* ; **Bureau** : Inbar FIJALKOW, Isabelle QUEINNEC, Fabrice THEOLEYRE, *Secrétaire du conseil*, Hélène TOUZET ; **Membres** : Michel BEAUDOUIN-LAFON, Marie-Paule CANI, François CHAUMETTE, Gérald CONREUR, Véronique CORTIER, Cyril GAVOILLE, Guy GOGNIAT, Julien GOSSA, Andreas HERZIG, Jean KRIVINE, Philippe LAMARRE, Françoise LAMNABHI, Anne-Catherine LETOURNEL, Lionel SEINTURIER, Isabelle TELLIER, Serge TORRES, Charlotte TRUCHET, Alexandros TSOUKIAS, Michel VERLEYSEN

## 1. Objectif du document, méthodologie

La rédaction d'un rapport de prospective scientifique correspond à une des missions des conseils scientifiques d'instituts (CSI) au CNRS. Un tel rapport est à la fois à usage interne au CNRS (directions d'établissement, d'instituts, comité national), et à destination de la communauté scientifique. Dans ce cadre et en concertation avec la direction de l'institut, le conseil scientifique de l'institut INS2I du CNRS a souhaité orienter ce rapport de prospective autour du positionnement des sciences de l'information et leurs interactions dans le paysage scientifique global. Nous souhaitons ainsi pointer l'importance et le rôle de notre discipline dans une période où notre domaine est traversé par de profondes évolutions technologiques, sociétales et scientifiques.

Pour porter cette réflexion, nous avons fait le choix de nous appuyer, entre autres, sur des auditions de personnalités de nos domaines. Ces auditions, menées en petits groupes de discussion, ont donné lieu à des échanges extrêmement riches qui ont nourri la réflexion du conseil dans l'élaboration de ce rapport. Elles ont été conduites sur la base d'une trame commune articulée autour de cinq thèmes :

1. Comment définir notre discipline ? Quelles en sont les grandes réalisations ?
2. Quelles sont les évolutions envisageables dans les 10 à 20 prochaines années ?
3. Quels sont les plus grands enjeux et risques ?
4. Comment notre discipline va-t-elle impacter les autres sciences ? Comment gérer la mobilité thématique dans la recherche aux interfaces avec les autres disciplines ?
5. Comment notre discipline va-t-elle impacter la société au sens large, concernant notamment l'enseignement et l'éducation populaire ?

Nous tenons à remercier vivement les personnes ayant participé à ces ateliers de discussion, dont la liste est fournie à la fin de ce document.



Enfin, la prospective réalisée dans ce document se nourrit également du travail du conseil lors de ces quatre dernières années, en particulier autour de l'organisation de séminaires thématiques. Ces séminaires nous ont permis de porter une réflexion plus spécifique sur une dizaine de thèmes transversaux ou disciplinaires. Beaucoup des enjeux abordés lors de ces séminaires ont également été discutés à travers les ateliers préparatoires à l'élaboration de ce rapport, notamment autour de la place des femmes dans nos disciplines ou bien encore autour des enjeux d'éthique. Les synthèses de ces séminaires sont données en annexe de ce document et les documents de travail sont disponibles en accès libre sur le site internet du conseil (<https://csins2i.irisa.fr/>).

## 2. Introduction : Comment définir notre discipline ?

Les sciences de l'information et leurs interactions couvrent un spectre scientifique très large et très riche. Elles comprennent la « science des ordinateurs » et la transcendent. Le traitement de l'information et la modélisation en constituent des éléments fondamentaux. Nous pourrions même affirmer que les sciences de l'information consistent à modéliser, simuler, observer, analyser et réguler le monde.

Les sciences de l'information représentent également de façon naturelle une « science à l'interface », qui se nourrit des interactions avec les autres disciplines telles que les mathématiques, la physique, la biologie, les sciences humaines et cognitives. Les frontières sont de plus en plus perméables. Ainsi, les probabilités-statistiques sont nécessaires pour l'informatique<sup>1</sup> et inversement. Les mathématiciens conçoivent des outils et un ensemble de théories sur lesquelles ils s'appuient. Les informaticiens doivent eux concevoir des outils, tout en garantissant leurs performances. Si les mathématiques sont le langage historique des sciences, au 21<sup>e</sup> siècle, l'informatique est en passe de devenir aussi un nouveau langage universel des sciences.

L'informatique s'attache enfin à répondre à des besoins concrets, qu'ils soient scientifiques, industriels ou sociétaux en proposant des modèles, méthodologies et outils permettant de mettre en œuvre des solutions innovantes. Grâce en partie à ces avancées, la technologie évolue très vite. Cela amène notre science à interagir avec toutes les facettes de nos vies et avec une rapidité d'évolution unique dans le monde scientifique. Cela engendre des défis "à débits rapides" pour lesquels nous devons développer des stratégies nouvelles pour y apporter des réponses. Cela change la manière traditionnelle de poser les problèmes scientifiques, en pose de nouveaux et conduit notre discipline à être particulièrement réactive et à évoluer très vite.

## 3. Quelles en sont les grandes réalisations ?

### 3.1. Au sein de notre domaine

En raison de sa diversité et de la variété de ses applications, l'informatique se décline en un grand nombre de sous-domaines ou d'écoles de pensées. Les dernières décennies ont été

---

<sup>1</sup> Par souci de concision, dans ce rapport, "informaticien-ne" et "informatique" sont pris dans une acceptation large déclinant tout le spectre disciplinaire de l'INS2I.



marquées par des créations majeures qui impactent aujourd'hui nos champs disciplinaires, mais aussi les autres sciences et la société au sens large. A titre d'exemple, nous pouvons citer :

- Certains problèmes d'IA étaient réputés inaccessibles. Ils ont pourtant été résolus récemment grâce à l'**apprentissage statistique** qui permet d'analyser des données et d'en tirer de l'information utile même quand des modèles physiques n'existent pas ou sont inaccessibles, que ce soit dans des domaines où les données sont abondantes (réseaux sociaux, traitement du langage, reconnaissance d'images, jeux de Go, d'échec, ...) ou d'autres où les données sont rares (questions de médecine personnalisée, etc.) ;
- La **science des données** dépasse les frontières de l'apprentissage statistique en incluant la simulation, le stockage des données et la modélisation, y compris pour de très grands ensembles de données et/ou des algorithmes consommateurs de ressources, pour lesquels l'évolution du matériel et des logiciels informatiques est un élément clé;
- Le comportement des algorithmes eux-mêmes peut être analysé par des outils issus de la **combinatoire** ;
- Dans un monde connecté, les **codes correcteurs d'erreur** (turbo code) permettent de fiabiliser des transmissions dans des environnements bruités et/ou mobiles. Ils ont permis des avancées majeures en termes de débit et de fiabilité ;
- La **cryptographie** représente un élément clé en sciences de l'information, devant assurer un compromis entre confidentialité/inviolabilité et exploitation des données. Les fonctions cryptographiques doivent pouvoir s'exécuter de façon sûre sur une large palette d'équipements, de plus en plus embarqués ;
- Notre domaine scientifique a aussi permis des réalisations majeures autour de la **compression des données, de la sécurité et de la communication**. A titre d'exemple, les gains en compression sont de 50% tous les 5 ans. Même si cette discipline est ancienne, elle continue d'évoluer et conduit aujourd'hui à l'élaboration de standards technologiques majeurs ;
- Dans des systèmes critiques intégrant de plus en plus de logiciels, les méthodes de **preuves formelles** permettent de certifier le comportement d'un système. En garantissant des propriétés de façon formelle, la discipline a permis ainsi une dissémination dans un nombre toujours croissant d'applications ;
- Le **génie logiciel** a permis de rendre la partie logicielle flexible et réutilisable, dans un monde informatique de plus en plus complexe. Un logiciel repose maintenant sur un ensemble de modules, et ne peut plus être développé de façon monolithique ;
- L'**automatique numérique**, au sens de la convergence entre approche mathématique et outil numérique, a permis de faire le pont entre des méthodes très pratiques et des méthodes très formelles (conditions d'existence). Cette combinaison du formel et du numérique permet de résoudre des problèmes de plus en plus complexes, par exemple autour des systèmes embarqués connectés.

## 3.2. En lien avec les autres disciplines

Notre discipline a naturellement permis de grandes réalisations aux interfaces, en lien avec les autres disciplines. Telle une boutade, si nous tentons d'identifier les sciences qui ne sont pas impactées par les sciences de l'information, nous pourrions même répondre qu'il n'en existe aucune. En retour, ce travail aux interfaces vient également **enrichir nos problématiques scientifiques**, en nous aidant à identifier des verrous dans nos propres champs disciplinaires.

**Données scientifiques.** Dans de nombreuses sciences, le verrou est passé de l'acquisition des données à l'analyse des données, ce qui est un changement de paradigme. Dit autrement, le coût de l'analyse des données devient plus élevé que le coût de l'acquisition de ces mêmes données. Gérard Berry résume cela en faisant remarquer que nous sommes passés « *de la matière à l'information* ». Ce paradigme s'applique aussi bien en médecine qu'en biologie, ou en sciences humaines. Le traitement de ces données accumulées requiert des développements en sciences des données, souvent avec de nouvelles questions pour notre discipline. En biologie, par exemple, la nécessité de devoir gérer des quantités croissantes de données de génomes a conduit au développement de nouvelles structures d'indexation de données, telles que des index probabilistes ou des structures succinctes, qui permettent de passer à l'échelle.

**En médecine,** l'informatique a permis la réalisation d'avancées majeures, en particulier en imagerie médicale ou pour la conception de dispositifs implantables, l'élaboration de robots chirurgicaux ou de prothèses intelligentes ou plus généralement autour de la médecine personnalisée. De même, la radiologie bénéficie amplement des avancées en traitement d'image et en apprentissage automatique. Comme dans les autres sciences, le **formalisme** de nos disciplines diffuse également en médecine. Les sciences de l'information reposent très souvent sur une partie modélisation, pierre angulaire pour formaliser le contexte et permettre ainsi d'exécuter un algorithme efficace. Ainsi, en médecine, nous devons modéliser les processus (patient, intervention, contexte). Bien souvent, cette expertise métier est détenue par quelques personnes, qui ont engrangé durant de longues années un ensemble de cas permettant de forger des « règles ». Un formalisme permet notamment de réduire la variabilité.

**En sciences de l'univers,** les sciences de l'information ont joué un rôle majeur dans le succès de la mission Planck, en permettant le recueil et l'analyse des données. Cette mission a permis l'observation du rayonnement fossile de l'univers et constitue une découverte scientifique majeure pour aider à mieux comprendre les mécanismes qui ont présidé à l'apparition des galaxies. L'analyse des données n'a été possible que grâce à l'élaboration de nouvelles approches **de séparation de composantes** dans les signaux.

L'informatique permet maintenant d'attaquer des problèmes complexes via la résolution du **problème inverse**, c'est-à-dire déterminer les causes en partant d'observations. En effet, les observations ne suffisent souvent pas à caractériser entièrement le modèle. De nombreuses disciplines peuvent ainsi s'intéresser à des classes de problèmes plus larges, en s'appuyant sur notre discipline.

Dans le domaine de la **cybersécurité**, et de la science des données au sens large, le besoin d'anonymisation des données dans un nombre croissant d'applications (par ex. médical, défense, Cyber-Physical & Human Systems - CPHS, véhicule connecté) est

confronté à une problématique d'exploitation de ces données. Un compromis entre vie privée et utilisabilité doit être exploré et constitue un verrou scientifique en soi.

### 3.3. Impacts sociétaux (vie sociétale, vie économique)

Grâce à tous ces liens avec les applications, les succès majeurs de l'informatique ont eu un impact très important et souvent rapide dans la société. Les usagers s'y sont très vite habitués, et l'usage en a rapidement été banalisé.

Le déploiement croissant des smartphones a par exemple bouleversé de nombreux aspects de notre vie quotidienne. Nous avons changé notre manière de communiquer, de nous informer, de nous organiser. Nous nous sommes habitués à accéder à un volume croissant d'informations et de manière instantanée. Nous partageons, de manière contrôlée ou non, de plus en plus de données sur notre vie privée. Tout cela modifie nos façons de penser : le temps informatique et le temps humain ne sont plus sur la même échelle.

Les sciences du numérique ont également un impact massif dans la vie économique. Ainsi, le numérique prend une place de plus en plus prépondérante dans un nombre croissant de professions, menant à la « *digitalisation* » des métiers. L'informatisation des entreprises et des administrations est entrée dans nos quotidiens avec des conséquences importantes sur les organisations de ces structures. Ici, l'informatique n'est pas intervenue seule, mais a eu un effet de levier dans la vie courante (sécurité bancaire, analyse biométrique, codage, compression d'images, vidéos, internet, télécommunications, diffusion de contenus, agents conversationnels, etc.).

Une combinaison des nombreuses techniques informatiques (modélisation et simulation numérique, IA, sécurité et preuve des logiciels, etc.) a permis également d'améliorer la fiabilité et la sécurité dans les transports. Ainsi, de nouveaux systèmes d'assistance ou de pilotage automatique ont vu le jour récemment (trains, avions, voitures autonomes, drones, etc.). L'informatique conduit également à la transformation de plusieurs professions, comme celles de notaire ou de journaliste. Dans le domaine de la santé, nous pouvons citer l'essor de l'informatique à l'hôpital pour collecter, analyser et gérer les données de patients. L'exercice de la médecine commence ainsi à en être profondément modifié. Nous assistons même au développement de nouveaux secteurs économiques, tels celui concernant les objets connectés dans les bâtiments intelligents ou encore « *l'économie du partage* ». Les métiers liés aux progrès des sciences de l'information évoluent très vite, et une grande partie des futurs emplois ne sont pas encore connus.

## 4. Enjeux

### 4.1. Pour la discipline

L'évolution des usages dans un monde de plus en plus connecté implique d'avoir accès à des fonctionnalités riches à travers des réseaux variés et des interfaces multiples (du smartphone à l'ordinateur de bureau, de l'objet IoT à l'agent conversationnel et au robot). L'environnement et les systèmes à prendre en compte ne sont donc plus limités au paradigme utilisateur/interface/machine tel un ordinateur, son clavier et sa souris. Ils

deviennent beaucoup plus riches, mais aussi beaucoup plus complexes et dynamiques. L'informatique ubiquitaire, un thème de recherche déjà ancien, est en train de passer dans les usages avec par exemple les systèmes distribués et l'Internet des objets.

Les problèmes scientifiques derrière ces enjeux sont nombreux. Ils incluent par exemple les algorithmes en ligne (capables de traiter les données au fil de l'eau), la vérification, la certification, la transparence et l'explicabilité des algorithmes de traitement des données, le passage à l'échelle et la sécurité des données et des traitements. L'acceptabilité des futurs systèmes dépendra notamment de leur transparence et des niveaux d'explication qu'ils pourront fournir. Par exemple, les succès actuels de l'IA statistique se heurtent à sa capacité limitée d'explication. Aussi faut-il peut-être envisager des approches combinant l'IA symbolique avec des méthodes d'apprentissage profond, afin de répondre à ces enjeux de transparence et d'adaptabilité.

L'optimisation globale avec décision distribuée constitue un des grands défis de notre discipline. Un système doit pouvoir par exemple exploiter les capacités de calcul d'un réseau de capteurs, des méthodes efficaces pour le traitement du signal, l'analyse de données en grandes dimensions, les problèmes inverses, l'utilisation de la géométrie de l'information, etc.

#### 4.1.1. Confiance dans la technologie, responsabilité et preuve

A mesure que la complexité des objets numériques augmente, il est nécessaire d'améliorer la compréhension de ces objets par leurs utilisateurs. Ils doivent ainsi avoir les moyens de comprendre ce qu'ils utilisent et d'avoir une perception claire, étant informés de l'effet de leurs actions et du fonctionnement des systèmes.

D'un point de vue scientifique, nous retrouvons les enjeux liés au passage à l'échelle, à la complexité des systèmes hétérogènes manipulés et à la masse des données produites. Par exemple, le développement d'heuristiques ("boîtes noires") efficaces mais dont le fonctionnement n'est pas certifié représente un des défis majeurs de l'IA. Il lui faut fournir également l'explication de ses résultats ("explicabilité"). Pour accepter de déléguer des prises de responsabilité à de tels systèmes, il faut être en mesure de les comprendre et de les analyser. Si l'on conçoit l'automatisation comme une boîte noire, comment distinguer la responsabilité de l'utilisateur de celle du système ? La question devient de plus en plus complexe avec l'accroissement de l'autonomie des robots et des systèmes, par exemple lors de l'usage d'un véhicule autonome ou d'un robot médical.

La notion de preuve (informatique, mathématique, automatique...) est ainsi un enjeu majeur de l'exploitation des données et des connaissances et du développement des systèmes interactifs et autonomes. Que ce soit pour les développements de logiciels, de contrôleurs et plus généralement d'outils d'exploitation de données, la certification doit être au cœur des développements et devra de mieux en mieux tenir compte de la complexité des systèmes. Lorsque la complexité est telle que toute preuve formelle semble hors de portée ou que les systèmes sont par nature incertains, ce sont des techniques de tests statistiques qu'il faudra développer. Enfin, les systèmes d'interaction humain-machine doivent prendre en compte les capacités humaines et faire en sorte que l'humain ne soit pas soumis aux décisions ou au fonctionnement de la machine, mais que celle-ci au contraire augmente et amplifie ses capacités (de décision, d'action, ...).



#### 4.1.2. Transparence, sécurité et usages des données

L'un des grands enjeux à la fois sociétal et disciplinaire est lié à l'accumulation toujours croissante des données et à leur impact croissant dans tous les domaines de la société. Cette évolution nécessite que la pensée informatique s'accorde avec cette montée en volume et que l'on sache apporter des réponses à des problématiques telles que le passage à l'échelle, l'accès aux données et leur stockage, l'échantillonnage, l'exploration, la représentation de l'information, etc.

Les risques sont importants quant au pouvoir donné à des acteurs industriels critiques et à certaines nations qui ont la capacité de collecter des données et de les utiliser sans préoccupation des aspects liés à la vie privée. A cet égard, les enjeux se situent bien évidemment en cyber-sécurité (informatique des données, etc.) mais aussi dans la sensibilisation de la France et de l'Europe à cette thématique afin de pouvoir développer de nouvelles approches pour la protection des données et de la vie privée. Dans les domaines où l'utilisation des données entraîne des questions d'évaluation du risque (par exemple dans le domaine médical), il est important que les développements incluent les questions de fiabilité des données et des décisions.

Le phénomène récent des "infox" (ou "fake news" en anglais) nous rappelle que la vérité est aussi un droit. De nombreuses applications reposent sur un petit nombre de structures privées mettant en œuvre sans réelle transparence des moyens de calcul et des algorithmes utilisant des données de plus en plus importantes. L'analyse des données et décisions doit pouvoir détecter rapidement les *comportements anormaux*.

Bien que difficile dans certains cas (ex. informatique médicale et plus généralement dans l'apprentissage automatique), l'informatique permet la reproductibilité scientifique. Aussi faut-il encourager les démarches qui vont au-delà de la transparence en fournissant non seulement les informations principales (algorithmes généraux ou code) mais aussi tous les éléments nécessaires à la reproductibilité d'une évaluation expérimentale (jeux de données). C'est une garantie de sérieux permettant d'éviter des résultats erronés ou mal interprétés, et qui est porteuse d'informations et facilite les avancées. De même, il est particulièrement intéressant de développer des bases de données dites "de vérité" permettant d'évaluer et de comparer objectivement des résultats.

L'apparition de la "science ouverte" ("open science" en anglais) propose des bonnes pratiques pour savoir comment gérer le triptyque publication / code / données en vue d'une réutilisation optimale et d'une mise à disposition auprès de la communauté.

### 4.2. En lien avec les autres disciplines

Ces avancées nécessiteront des liens encore plus étroits avec les chercheurs d'autres disciplines, mais aussi des perspectives interdisciplinaires larges afin d'intégrer aux modèles et aux algorithmes les caractéristiques propres des données manipulées. La question des données ouvre de nombreuses questions quant à l'effacement des frontières disciplinaires. Dans le domaine de la santé, par exemple, les implications sont considérables, depuis le traitement des données biométriques et les méthodes de travail des professionnels de santé jusqu'aux questions de sécurité, de confidentialité et de souveraineté dans la gestion de ces



données. Des questions similaires vont se poser dans les domaines de l'énergie, du patrimoine culturel, etc.

Les domaines d'utilisation des nouvelles technologies représentent également un aspect important du problème. Petit à petit, les chercheurs sortent de leur zone de confort en proposant des approches novatrices dans d'autres disciplines. Les utilisations et implications des technologies dans les domaines artistiques et environnementaux ne sont que deux exemples où des révolutions sont en train de s'opérer, dépassant largement nos frontières disciplinaires.

Les évolutions futures au niveau des technologies, des données associées et de leur exploitation influent également sur les comportements humains, de manière consciente ou inconsciente. La modélisation de ces derniers est donc un enjeu majeur, à l'interface entre les SHS et les sciences et techniques. Nous pouvons ainsi citer les problèmes d'influence de la tarification de la fourniture d'énergie sur les profils de consommation, du découpage électoral qui pourrait engendrer des biais géographiques et/ou socio-économiques, nuisant à terme à la démocratie.

La régulation pour éviter ces risques est une nécessité ; un enjeu majeur est de voir comment cette régulation peut être effectuée, en partant du constat que la régulation législative est souvent trop lente, donc inefficace, par rapport aux évolutions technologiques. Les liens entre évolutions technologiques et questions juridiques (sciences du droit) vont être amenés à se renforcer.

Nos disciplines entraînent également des changements dans le profil des chercheurs des autres disciplines. Par exemple, en linguistique, certains jeunes linguistes ne sont plus forcément des littéraires. De même, nous aurons besoin, non seulement de spécialistes dans nos disciplines, mais également de spécialistes à la fois dans nos disciplines et une ou plusieurs autres disciplines. Citons par exemple l'informatique quantique ou les machines moléculaires qui bénéficieront certainement de convergences multidisciplinaires. Ces domaines ont été abordés dans le [précédent rapport de prospective du CSI-INS2I](#) et les enjeux scientifiques associés restent encore de mise même s'il est difficile d'anticiper quand convergeront sciences et technologies dans ce domaine. Il est cependant nécessaire de maintenir un équilibre entre pluridisciplinarité et travail au cœur de la discipline.

## 4.3. Pour la société

### 4.3.1. Enjeux économiques

Il est toujours complexe de prévoir a priori l'impact économique des avancées scientifiques. Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous trouvons également l'informatique à l'origine de nouvelles professions ou de la transformation de professions existantes. De manière générale, nous pouvons considérer que l'évolution des sociétés modernes a été essentiellement caractérisée ces 30 dernières années par le développement des nouvelles technologies du numérique. Dans le même temps, nous assistons à deux phénomènes qui nécessitent une attention particulière :



- La concentration du marché des nouveaux services « informatiques » aboutissant à un petit nombre de fournisseurs qui produisent de facto des asymétries, coûteuses pour la société ;
- La mise en compétition du monde de la recherche par les services de R&D de grands acteurs (mentionnés auparavant), de nouveau de manière asymétrique.

Si nous ajoutons le problème que l'introduction massive de dispositifs de décision automatique n'est pas toujours faite avec une connaissance précise de leur impact, nous pouvons conclure que serait nécessaire une nouvelle réglementation de l'intégration entre humain et machines et de leur convergence au service de la société.

#### 4.3.2. Enjeux humains

Comme nous l'avons déjà dit, l'essor des sciences de l'information a bouleversé de nombreux aspects de notre vie quotidienne. La façon dont la technologie influence la société les comportements humains et les limites légales, personnelles et sécuritaires est au centre des préoccupations.

L'acceptation des systèmes numériques par l'humain représente un enjeu majeur. En effet, dans de nombreux domaines, les humains devront de plus en plus souvent interagir avec des systèmes de plus en plus difficiles à appréhender et les machines, les robots en particulier, devront interagir avec des humains. Il ne fait aucun doute que cela nécessitera de nombreuses adaptations et évolutions. Comment redéfinir la place de l'humain lorsqu'il est confronté à un système, une IA, s'il n'en comprend pas les décisions ? Que deviendra la notion d'expertise lorsque les systèmes d'apprentissage seront plus efficaces que les experts du domaine ? Comment faire en sorte que la migration des tâches ne conduise pas à une perte de compétence de l'humain mais au contraire au développement de nouvelles compétences (ex. des pilotes de ligne pilotent de moins en moins mais suivent des formations permanentes pour acquérir de nouvelles compétences) ? Cette question prend une dimension supplémentaire lorsque nous parlons des dispositifs implantables. Sans aller jusqu'au transhumanisme, de nombreuses questions éthiques se posent lorsque ces dispositifs embarquent de plus en plus d'algorithmes.

Les sciences de l'information ont déjà, et sont amenées à avoir un impact encore plus fort dans nos sociétés et sur nos vies. Les grands enjeux scientifiques sont ainsi totalement imbriqués avec les enjeux sociétaux, et les principaux risques pour le développement de nos disciplines sont liés à l'acceptation sociale, au respect de la vie privée et à l'utilisation « positive » des recherches. En effet, nos disciplines, comme toutes les disciplines, produisent des avancées à double tranchant. A titre d'exemple, la bioinformatique permet de mieux lutter contre les agents pathogènes et d'aller vers une médecine de précision et personnalisée. A l'inverse, elle produit de nombreuses données personnelles dont l'usage n'est pas toujours bien réglementé. Cependant, la protection de la vie privée ne doit pas se traduire par un frein pour la recherche (données médicales par exemple), surtout quand d'autres pays appliquent des règles moins strictes. Les enjeux de recherche consistent donc à la fois à garantir la sécurité des données et à permettre leur exploitation dans des conditions acceptables. Un enjeu majeur pour l'avenir de notre discipline est donc lié à ses interactions avec les SHS.



### 4.3.3. Enjeux de Formation

Toutes ces mutations doivent être accompagnées d'une sensibilisation générale de la société aux enjeux des sciences de l'information. Il est nécessaire de rendre les sciences numériques accessibles, de les démystifier et de prévenir les fantasmes liés à leurs usages, afin également d'éviter la fracture numérique. Le développement des sciences de l'information, leur diffusion et leur bon usage dans la société ne pourra se faire qu'avec une évolution en profondeur de notre système de formation. L'enjeu est double. Il s'agit à la fois de former l'ensemble de la société *a minima* à la pensée informatique et aux interactions avec les systèmes informatisés, mais aussi de faire face aux besoins critiques des métiers numériques.

Il faut œuvrer pour un vrai enseignement de l'informatique à l'école. Cet apprentissage peut démarrer dès l'école primaire, sous forme ludique. Il doit s'intensifier au collège et au lycée. Cela passera par un effort massif sur la formation des éducateurs, en particulier à travers le développement d'un enseignement disciplinaire propre, associé à un CAPES informatique. Une maîtrise de base de la discipline doit faire partie du bagage de tout scientifique au baccalauréat. L'université et les écoles d'ingénieurs, quant à elles, ont largement fait évoluer leur offre de formation depuis 20 ans. Cet effort doit être poursuivi, avec une meilleure intégration des sciences du numérique dans tous les cursus. Nous pourrions par exemple penser au développement de modules pluri et interdisciplinaires avec d'autres domaines scientifiques, comme la biologie, les mathématiques appliquées, la physique, la linguistique, les SHS. De plus, il faut favoriser la formation tout au long de la vie. Les modes d'apprentissage se sont élargis depuis plusieurs années, aidés en cela par les sciences de l'information, via des solutions d'accès simple et à coût faible, comme avec les cours en ligne ou les MOOC (Massive Open Online Course). Ces solutions d'apprentissage peuvent avoir un large impact sur la société de par leur diffusion de masse. L'apport des sciences de l'information dans ce domaine pourrait ainsi permettre de les développer (pour mieux s'adapter à l'apprenant par exemple).



## 5. Conclusion

Les sciences de l'information et leurs interactions ont pris une place nouvelle et centrale dans le paysage scientifique global et nous amènent à relever de nombreux défis technologiques, sociétaux et scientifiques. Un enjeu central sera de démontrer notre capacité à maîtriser notre destin dans le domaine du numérique, afin de ne pas être "colonisés" par des acteurs privés et mondialisés. L'Europe, et en particulier la France, doivent être en mesure de préserver une recherche et une éducation d'excellence dans le domaine du numérique pour garder leur indépendance et survivre. C'est bien sûr vrai pour des enjeux scientifiques, mais c'est également vrai pour des enjeux économiques, de souveraineté et de sécurité. Faire monter et/ou maintenir en compétence le tissu industriel national et européen, tout comme garantir notre sécurité en matière de numérique passe par le maintien d'une recherche française d'excellence dans le domaine des sciences de l'information. Un tel maintien en France dans notre domaine se fera dans un contexte d'extrême concurrence pour recruter les futurs talents et les retenir. En comparaison avec les GAFAM, notre avantage compétitif ne se fera pas sur les rémunérations. Même si les écarts devront être réduits, notre facteur de différenciation doit se focaliser d'une part sur le maintien d'un statut garantissant au chercheur un recrutement jeune et une liberté scientifique, dans un cadre éthique garanti, et d'autre part sur la mise à disposition de moyens publics significatifs afin d'alléger les contraintes actuellement très lourdes de recherche et de gestion de crédits. La demande extrême de "*multitâchisation*" des chercheurs représente un frein extrêmement important dans le maintien de l'excellence de notre recherche, et de son attractivité dans le monde sans-frontière de la recherche dans notre domaine.

Enfin, et pour conclure, à travers l'élaboration de ce rapport, les différents échanges qui ont eu lieu ont fait émerger un questionnement nouveau des participants sur la manière dont notre discipline évolue et autour de l'impact croissant de l'informatique dans nos vies quotidiennes et nos métiers. Cette prise de conscience "silencieuse" est en soit, elle-même, porteuse de changements à venir dans la manière de définir et d'aborder les enjeux scientifiques dans les sciences de l'information et leurs interactions. Ces changements restent difficiles à prédire, les directions qu'ils vont prendre produiront sans doute des ruptures dans la manière dont les chercheurs vont faire évoluer leurs thématiques scientifiques, changeant également nos manières de fonctionner et d'interagir avec les autres disciplines.

## Remerciements

Le conseil scientifique tient particulièrement à remercier les personnes suivantes pour leurs contributions au travail du conseil et à son organisation :

- Danuta Dufrat-Chabrière, *Assistante du Comité National*
- Invités permanents aux séances du Conseil Scientifique : Frédérique BASSINO et Hubert COMON-LUNDH, *Président-e-s de la section 6*; Michèle BASSEVILLE et Pierre-Olivier AMBLARD, *Président-e-s de la section 7*; Dimitri PEAUCELLE et Valerie BERTHE, *Représentants du Conseil scientifique du CNRS*; Eduardo ROCHA, Michael BLUM, Guillaume FERTIN, Dominique LAVENIER, *Représentants de la CID 51*; Jean-Pierre NADAL, *Représentants de la CID53*
- Invités des séminaires thématiques au cours du mandat : Jean-François GIBRAT, Eric FLEURY, Michel DE MATHELIN, Jean-Marc VÉZIEN, Vivien QUEMA, Brigitte PLATEAU, Isabelle COLLET, Anne PÉPIN, Gérard BERRY, Jean-Marc JÉZÉQUEL, Jean-Yves MARION, David MONNIAUX, Max DAUCHET, Raja CHATILA, Karën FORT, Herve CHNEIWEISS, Magali FITZGIBBON, Xavier LEROY, Marie-Anne SAINT-JALMES, Aurélien FRANCILLON, Andrzej DUDA, Merouane DEBBAH, Mariana NETTO, Frédéric VANDERHAEGEN, Franck MARS, Antoine CHAILLET, Remi RONFARD, Gérard ASSAYAG, Philippe GAUSSIER, Serge ABITEBOUL, Jérôme LANG, Benjamin NGUYEN, François PELLEGRINI, Franck LETHIMONNIER, Catherine NGUYEN, Carine GIOVANNANGELI, Etienne HIRSCH, Pierre-Olivier COURAUD

Par ailleurs, nous tenons à remercier vivement les personnes ayant participé aux ateliers de discussion préparatoires à l'élaboration de ce rapport de prospective :

- Gildas AVOINE, Meghyn BIENVENU, Laure BLANC-FERAUD, Patrick FLANDRIN, Olivier GASCUEL, Antoine GIRARD, Christine GUILLEMOT, Jean-Marc JEZEQUEL, Jérôme LANG, Claire MATHIEU, Laurence NIGAY, Joseph SIFAKIS, Sophie TARBOURIECH, Jocelyne TROCCAZ