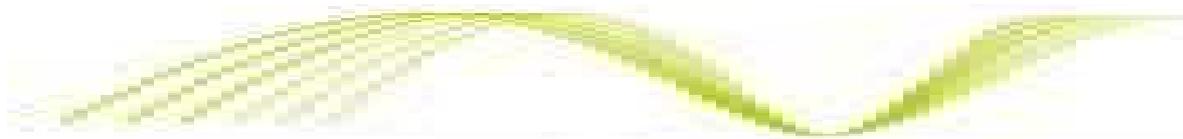




Contribution d'Allistene et des Pôles de compétitivité à la Stratégie Nationale de Recherche Sciences et Technologie du Numérique



Textes complets

Synthèse disponible sur : www.allistene.fr



Contribution d'Allistene et des Pôles de compétitivité à la Stratégie Nationale de Recherche Sciences et Technologies du Numérique

Juillet 2013

Ce document présente la contribution d'Allistene et des Pôles de compétitivité du numérique à la stratégie nationale de recherche. Il est composé de deux parties : une synthèse qui présente les enjeux stratégiques de la recherche en sciences et technologies du numérique et un recueil complet des contributions détaillées de chaque groupe de travail.

Pour conduire la réflexion sur cette stratégie de recherche, des groupes de travail composés d'experts des établissements membres de l'alliance et des pôles de compétitivité et des groupes de travail inter-alliances (Allistene et Aviesan, Ancre, Allenvi, Athéna) se sont réunis durant les mois de mai et de juin 2013.

Un comité de pilotage composé du Comité de coordination d'Allistene et des Présidents des pôles de compétitivité a supervisé la rédaction. La liste des experts ayant participé à la rédaction figure en troisième partie du document.

Sommaire

Contenu

Partie II - Textes complets	7
1. Sciences et technologies du logiciel.....	7
1.1 Questions fondamentales liées au logiciel	8
1.2 Langages et outils de programmation, spécification et exécution	11
1.3 Outils pour l'architecture de systèmes	13
1.4 Logiciels pour l'interaction homme-machine	14
1.5 Questions générales	15
2. Formation numérique de masse.....	17
2.1 Défis en formation.....	18
2.2 Forces et faiblesses françaises	20
2.3 Recommandations	20
3. Sécurité de la Société Numérique	24
3.1 Impact social et sociétal de la sécurité numérique	24
3.2 Perspective 2020-2025 du secteur.....	25
3.3 Domaines clefs de recherches scientifiques et technologiques	32
3.4 Analyse des forces et faiblesses	38
3.5 Propositions de mise en place optimale	40
3.6 Sécurité numérique et prise en compte du défi du renouveau industriel	41
4. Traitement des données massives, Connaissances, Décision, Calcul Haute Performance, et Simulation Numérique	42
4.1 Tendances de la recherche.....	44
4.2 Grandes évolutions attendues (recherche et industrie).....	45
4.3 Ruptures technologiques /méthodologiques nécessaires.....	47
4.4 Principaux acteurs	48
4.5 Forces et faiblesses.....	48
4.6 Grandes priorités	49
4.7 Recommandations pour la mise en place d'un écosystème efficace.....	50
4.8 Recommandations recherche.....	51
4.9 Retombées attendues	52
5. Interactions des mondes physiques, de l'humain et du monde numérique	53
5.1 Forces et faiblesses de la France	53
5.2 Grandes tendances, ruptures technologiques et méthodologiques	54
5.3 Avancées directement valorisables et génératrices d'emplois	57
5.4 Priorités pour stimuler le renouveau industriel	58

6.	Le numérique au service de la qualité de vie	60
6.1	Grandes tendances technologiques et méthodologiques	60
6.2	Forces, faiblesses, opportunités.....	63
6.3	Perspectives sur l’emploi et le renouveau industriel.....	64
7.	Réseaux numériques à hautes performances	67
7.1	Inventaire des Forces & Faiblesses	67
7.2	Analyse des tendances, évolutions, ruptures	68
7.3	Propositions d’avancées	69
7.4	Identification des priorités.....	71
8.	Maîtrise des composants nanoélectroniques et nanophotoniques	73
8.1	Grandes tendances, grandes évolutions, ruptures technologiques ou méthodologiques	74
8.2	Avancées significatives, directement valorisables et génératrices d'emplois	77
8.3	Forces et faiblesses.....	79
8.4	Défi du renouveau industriel et identification des priorités permettant de stimuler ce renouveau	80
8.5	Combinaison d’outils, de plateformes en soutien aux priorités du renouveau.....	82
8.6	Recommandations	83
9.	ALLISTENE-ALLENVI - Interactions Monde Numérique (Allistene) et Environnement (Allenvi).....	85
9.1	Inventaires des forces et des faiblesses	87
9.2	Analyse des grandes tendances, grandes évolutions	88
9.3	Propositions d’avancées significatives directement valorisables et génératrices d’emplois.....	90
9.4	Propositions d’avancée avec prise en compte du défi du renouveau industriel et identification des priorités permettant de stimuler ce renouveau.....	92
10.	ALLISTENE-ANCRE - Numérique (Allistene) et Energie (Ancre).....	93
10.1	Contexte, Domaine d’interface TIC / Energie et enjeux de recherche associés	93
10.2	Forces et faiblesses.....	100
10.3	Recommandations	101
11.	ALLISTENE-ATHENA - Numérique (Allistene) et Sciences Humaines et Sociales (Athena).....	103
11.1	Bien-être et fragilité	103
11.2	Des bonnes pratiques de l’activité physique	104
11.3	Prévenir et accompagner la perte d’autonomie	105
11.4	Accès à la formation tout au long de la vie	106
11.5	Comprendre et accompagner les apprentissages	107
11.6	Interfaces intelligentes.....	108
11.7	Les conventions de visualisation de données	109

11.8 Attention.....	110
11.9 Le verrou linguistique	111
11.10 Technologies réflexives.....	111
11.11 Pervasive social computing – informatique socio-pervasive	113
11.12 Cybersécurité et fiabilité des systèmes.....	114
11.13 Vie privée	115
11.14 Aménagement urbain plus humain.....	116
11.15 Facteurs humains dans l’usine du futur.....	117
11.16 Techniques de mesure du climat	118
11.17 Les techniques de marché (financier).....	119
11.18 Crowdsourced intelligence	120
11.19 Web participatif solidaire	121
11.20 Equiper la démocratie en réseaux.....	122
11.21 Décision.....	123
11.22 Innovation, STIC et partenariats SHS-industries	124
11.23 Innovation et création, arts, SHS.....	125
Partie III - Liste des experts	126
Comité de coordination d’Allistene	126
Pôles de compétitivité du Numérique	126
Groupes de travail Allistene – Pôles	126
Technologies logicielles:.....	126
Formation, connaissance, décision:.....	126
Sécurité de la société numérique:.....	127
Traitement des données massives, calcul haute performance, et simulation numérique:	127
Interactions des mondes physiques, de l’humain et du monde numérique:.....	127
Le numérique au service de la qualité de vie:	127
Réseaux numériques à haute performance:.....	128
Maitrise des composants nanoélectroniques et nanophotoniques:.....	128
Groupes de travail Allistene – Alliances.....	128
Allistene - Allenvi, numérique et environnement	128
Allistene - Ancre, numérique et énergie.....	129
Allistene - Athena, numérique et sciences humaines et sociales	129
Allistene - Aviesan, numérique et santé.....	129

Partie II - Textes complets

1. Sciences et technologies du logiciel

Ce chapitre traite de la recherche en sciences et technologies du logiciel, élément clé de la chaîne du numérique. Les technologies logicielles offrent des outils aussi bien pour créer les nouvelles technologies de l'enseignement virtuel que pour fiabiliser et sécuriser la chaîne du numérique. Elles s'embarquent dans les équipements de calcul, structurent les algorithmes de traitement de données, donnent l'intelligence aux outils d'interface avec le monde physique et l'humain. Elles fournissent les éléments pour coder les informations à transmettre et les architectures nécessaires à l'utilisation des composants électroniques. Au total, qu'il soit visible ou enfoui et caché, le logiciel est présent dans l'ensemble des éléments de notre société. Il accompagne partout l'individu dans ses actions, échanges, recherches et transactions, et conduit ses machines.

Mais le développement de logiciel est toujours difficile, ce qui semble constamment sous-estimé du donneur d'ordre au programmeur en passant par le chef de projet. Cette difficulté ira en s'amplifiant avec la généralisation du parallélisme et des réseaux dans les architectures et les applications. Une vraie approche scientifique est donc absolument indispensable, car les méthodes artisanales montrent vite leurs limites. Elle doit mettre au même niveau les modèles théoriques qui reposent sur une modélisation mathématique du réel (déterministe ou aléatoire) de plus en plus fine et nécessitent des outils d'analyse à développer, les aspects mathématiques et informatiques liés au contenu même des codes, le développement de l'outillage et la réalisation des applications. Les cadres formels et méthodes scientifiques adaptés sont étudiés depuis longtemps, avec de grands succès qui font que les langages, outils et programmes sont bien plus sûrs qu'auparavant. Mais la situation est encore loin d'être idéale, et le parallélisme la complique considérablement car il reste globalement mal compris. La France est historiquement très présente en recherche logicielle. Elle reste un grand acteur mondial en modélisation mathématique, langages de programmations, vérification de programmes, informatique embarquée, traitement d'images, etc. Plusieurs sociétés industrielles leader dans leur domaine sont directement issues de la recherche. Mais l'adaptation aux sujets explosifs que sont l'architecture des systèmes complexes, la programmation distribuée et celle du Web et des applications sur terminaux mobiles n'est pas encore garantie et doit être mieux organisée.

Sur le plan économique, la contribution directe au PIB de la « filière numérique » française est estimée, par une étude récente, à 72 milliards d'euros en 2010, pour 3,7 % du PIB français et un quart de sa croissance. En 2015, selon ces mêmes prévisions, elle devrait contribuer à hauteur de 129 milliards d'euros (5,5 % du PIB), la part du logiciel et des services informatiques devrait s'établir à 41 milliards d'euro et représenter environ le tiers de la filière numérique.

La situation industrielle est complexe, car le logiciel est réparti dans toutes les industries. Les éditeurs de logiciels vont du grand (Dassault Systèmes, seule société française dans les 100 premières mondiales en informatique) au moyen ou petit dans un grand domaine (jeux vidéos, etc.) ou dans un des nombreux marchés de niche (outillage logiciel spécialisé pour un domaine d'application, applications Web et téléphone portable, instrumentation, automatisation, etc.). L'écosystème reste fragmenté et globalement encore faible par rapport à la concurrence internationale malgré ses grandes qualités techniques. De plus, bon nombre des sociétés de logiciel les plus innovantes sont devenues étrangères (principalement américaines) pour cause de succès. Par ailleurs, beaucoup de logiciels importants sont développés au sein d'autres industries : logiciels embarqués en avionique, ferroviaire, automobile, télécommunications, robotique et médical, systèmes d'information d'entreprises

ou d'administrations, systèmes de réservation, bases de données et systèmes transactionnels divers, etc. Il est donc très difficile d'avoir une vision industrielle stratégique sur l'ensemble du secteur logiciel.

Le découpage technique que nous utilisons ci-dessous est traditionnel et reste pertinent. Nous avons choisi d'y incorporer la conception et la vérification des circuits et systèmes électroniques, qui est essentiellement logicielle, utilise et développe des techniques communes avec d'autres domaines, et perdrait donc à être oubliée ou traitée ailleurs. Mais les sujets mentionnés ne sont évidemment pas étanches, et les communautés doivent continuer à s'ouvrir et à collaborer entre elles et avec d'autres disciplines. Comme le logiciel est partout, il y a aussi de nombreux recouvrements avec les 7 autres chapitres de ce document, dont certains demandent des recherches spécifiques dans la théorie (conception mathématique et informatique du contenu) et la pratique du logiciel, en particulier sécurité, données massives / hautes performances, interactions et réseaux.

1.1 Questions fondamentales liées au logiciel

Complexité algorithmique et nouveaux paradigmes de calcul

L'étude de la complexité des algorithmes et la mise au point de méthodes algorithmiques efficaces en partie indépendamment de l'application visée restent un sujet d'étude crucial puisque la taille des données à manipuler croît sans cesse. Les sujets suivants sont d'importance permanente :

- La classification de la « difficulté » des problèmes selon le modèle de calcul (ou le type d'ordinateur) utilisé. L'une des questions centrales du sujet « $P = NP ?$ » reste encore non résolue à ce jour. La complexité du calcul parallèle et la complexité en énergie consommée (de nouveaux algorithmes mathématiques moins gourmands en énergie sont à développer) sont aussi des domaines essentiels devant largement progresser.
- L'étude d'autres modèles de calcul, comme les ordinateurs quantiques ou les réseaux neuronaux du calcul bio-inspiré ; ces modèles doivent être mieux compris, car ils pourraient changer profondément la frontière entre le « facile » et le « difficile », et donc conduire à des révolutions dans certains domaines. Mais la façon de concevoir, de programmer et de vérifier leurs logiciels est un problème largement ouvert.
- L'étude de nouveaux modes d'interrogation (non-SQL) voire de structuration de grandes bases de données pour des corpus de nature variée (textes, images, vidéo, etc).
- Les algorithmes innovants en calcul scientifique : méthodes multi-pôles rapides, méthodes par ondelettes, méthodes de décomposition de domaines, bases réduites,
- La résolution approchée des problèmes difficiles. Les recherches les plus récentes en algorithmique modélisent précisément les diverses possibilités pour le terme « approché » : l'algorithmique probabiliste, efficace mais qui se trompe parfois ; l'algorithmique d'approximation, qui construit une solution d'assez bonne qualité à la place de la solution optimale, hors d'atteinte. Ces algorithmiques approchées jouent un grand rôle dans le cadre de l'apprentissage, sujet en pleine explosion.
- La résolution très efficace de problèmes « faciles » sur des entrées de grande taille, en utilisant l'algorithmique parallèle et distribuée et les multicœurs, essentielle pour le calcul scientifique à haute performance et le calcul dans le nuage.
- L'algorithmique à bas coût, quand les contraintes de mémoire, de temps de réponse et d'énergie sont essentielles, par exemple pour les cartes à puces et l'embarqué.

- Le rapport entre l'algorithmique du discret et celle du continu, par exemple pour le traitement du signal et de l'image ou pour la simulation.
- Et, partout, l'analyse fine de la performance des algorithmes, pour déterminer et optimiser les opérations les plus coûteuses. Elle demande une modélisation adéquate et réaliste des données dans le cadre de l'utilisation précise des algorithmes

Etat en France : *traditionnellement un point fort de la recherche française. Bon positionnement en complexité. Très bon positionnement en optimisation et apprentissage, en particulier sur les images et vidéos, sujet en plein essor. Bon positionnement sur les analyses de grandes masses de donnée, les méthodes statistiques et sur la programmation parallèle et distribuée, à amplifier car essentiel pour de très nombreuses applications à venir. Positionnement en progrès sur l'algorithmique parallèle et distribuée, ainsi que sur le rapport discret / continu.*

Proposition d'action : *tâche de fond à maintenir absolument car cruciale partout. Le financement public « blanc » est ici critique.*

Vérification de logiciels

Quand elle est applicable, la vérification formelle permet une sûreté et une sécurité bien supérieure à celle du simple test. Elle a beaucoup avancé, mais elle doit encore progresser sans ses principes et ses implémentations pour être applicable plus largement et accessible à des non-spécialistes.

- Vérification exacte de modèles (model-checking) : algorithmique de satisfaction Booléenne ou modulo théories, explorations d'automates implicites ou explicites, etc. Appliquée industriellement aux circuits électroniques et à certains programmes parallèles et temps réel, et aussi utilisée à grande échelle par les autres techniques ci-dessous.
- Vérification par abstraction de modèles : interprétation abstraite, raffinement, etc. S'applique déjà à des codes industriels séquentiels.
- Vérification par assistants de preuve. Applicable aux grands théorèmes mathématiques, aux compilateurs, aux systèmes d'exploitation, aux circuits électroniques, aux applications critiques, aux protocoles de sécurité.
- Vérification probabiliste : model-checking probabiliste, analyse des risques par arbres ou graphes de défaillance, probabilités et réseaux de Petri.
- Méthodes stochastiques pour l'analyse des codes (plans expérimentaux numériques et d'analyse statistique de sensibilité).
- Vérification formelle des logiciels de calcul numérique et de traitement du signal (avec nombres flottants), analyses de l'impact des incertitudes de valeur.
- Méthodes de développement conjoint preuves-programmes

D'autres techniques fondées sur le test et l'analyse des exécutions sont tout aussi importantes et d'usage industriel constant :

- Vérification par monitoring, ou « runtime vérification » : vérification des propriétés attendues du système sur ses traces d'exécution, diagnostic de fautes. Technique non-intrusive pour la supervision des systèmes distribués et la surveillance en général.
- Génération automatique de tests unitaires ou d'intégration, soit à partir de spécifications formelles, soit à l'aide d'algorithmes randomisés dirigés.
- Analyse de couverture des tests ou des exécutions réelles,

Etat en France : *positionnement correct sur la vérification de modèles, avec quelques produits de recherches pertinents, mais assez loin des leaders. Leader mondial en interprétation abstraite maintenant développée industriellement. Leader en assistants de preuve et leurs applications – sujet de recherche à développer et solidifier en priorité, car il*

peut conduire à des méthodes réellement innovantes de développement conjoint preuve-programmes. La vérification des logiciels de calcul numérique est difficile mais trop peu développée par rapport aux besoins, importants si ces logiciels déterminent des paramètres dimensionnants des systèmes industriels. Travaux en cours sur la génération de test et la vérification par monitoring, ainsi que sur les analyses de couverture associée.

Proposition d'actions : *Tâches de fond à maintenir absolument car cruciale partout. Le financement public est critique, mais les rapports avec l'industrie peuvent s'amplifier. Il faut rester au niveau mondial en vérification exacte, à cause de la variété des applications, et amplifier l'application industrielle de la vérification par abstraction en allant vers le parallélisme. Il faut développer les techniques probabilistes, susceptibles d'une plus grande applicabilité et d'un meilleur passage à l'échelle que les techniques exactes. Il faut faire un effort très important sur l'application des assistants de preuve, maintenant matures, en particulier pour les applications devant satisfaire des normes de sécurité (DO-178C, critères communs, etc.). Il faut continuer l'effort sur la génération de test et le monitoring pour les applications distribuées, et mieux comprendre les critères et analyses de couverture en fonction des besoins réels, en particulier dans pour les systèmes distribués.*

Quelques domaines algorithmiques essentiels

Algorithmique des graphes. Les graphes sont universellement utilisés dans la modélisation de systèmes : web et réseaux sociaux, réseaux biologiques, réseaux de télécommunication, etc. Il faut mieux comprendre quel type de graphes est associé à quel problème et améliorer l'algorithmique des très grands graphes, exacte mais de complexité est le plus souvent exponentielle, ou approchée par probabilités et approximations.

Calculs arithmétique, flottant et formel : calculs exacts avec des nombres gigantesques, par exemple en cryptographie ; calculs flottants où il faut gérer les erreurs d'arrondi de manière prouvée, pour l'analyse numérique et la simulation ; calcul formel manipulant des objets de manière exacte, par exemple pour les trajectoires en robotique. L'avenir est de rassembler points de vue dans des systèmes de calcul unifiés et prouvés, atteignant un compromis entre l'efficacité du calcul flottant et l'exactitude des calculs arithmétique et formel. Un tel système s'appliquerait dans des très nombreux domaines d'ingénierie.

Géométrie algorithmique. La géométrie algorithmique s'intéresse au calcul rapide sur de gros objets géométriques, de la CAO à la biologie des molécules. Elle s'utilise maintenant en analyse des données, où elle travaille en grande dimension. La recherche d'objet est un sujet d'actualité pour les statisticiens.

Traitement et synthèse d'images. Le traitement d'image est ubiquitaire, et particulièrement essentiel en médecine. L'informatique graphique s'intéresse à la synthèse d'images 2D ou 3D réalistes ou schématiques (géométrie, textures, éclairages, et.). Un sujet brûlant est la recherche d'objets ou de personnes dans des images et vidéos ou de grandes bases de données de celles-ci. Les interactions mathématiques couvrent les problèmes de compression et de stockage (notamment par méthodes d'ondelettes), les problèmes de reconstruction d'images incomplètes, les méthodes statistiques d'analyse d'image.

Traitement des incertitudes. A l'interface de la modélisation aléatoire et du calcul scientifique, la prise en compte du traitement des incertitudes est un enjeu crucial pour l'industrie.

Etat en France : *des équipes de premier plan dans tous ces domaines. Ici encore, des sujet fondamentaux à maintenir à don haut niveau tout en augmentant les collaborations recherche / industrie, car leur importance industrielle va en croissant.*

1.2 Langages et outils de programmation, spécification et exécution

Langages de programmation et de spécification

Ce sujet évolue constamment : des langages se stabilisent, d'autres apparaissent, par exemple pour le Web ou la programmation distribuée. Il y a une grande différence conceptuelle et pratique entre les méthodes et langages conçus artisanalement et ceux qui sont fondées sur des sémantiques mathématiques claires, objet de toute recherche moderne dans le sujet et préalable à toute vraie vérification de programmes. Si les langages de programmation sont bien compris, les langages de spécification le sont moins.

- Langages de programmation pour les architectures et applications parallèles et distribuées : multicœurs homogènes ou hétérogènes, supercalculateurs, calculs sur le nuage. Compilation optimisée pour ces cibles (fortement relié au chapitre HPC). Développement du calcul sur GPU et de langages adaptés.
- Langages de spécification de composants et d'APIs (Application Programming Interfaces). Bibliothèques de composants matériels et logiciels.
- Langage de spécification pour la programmation événementielle, la programmation de systèmes temps-réels et celle de systèmes à haute sécurité (transports, médical, etc.), avec liens forts sur la vérification formelle.
- Spécification et programmation conjointe matériel / logiciel, avec répartition souple.
- Programmation du Web et des applications smartphones / tablettes fondée sur le modèle client-serveur et la détection, la composition et l'orchestration de services, qui pose beaucoup de problèmes nouveaux et dont les applications explosent industriellement.

Etat en France : *excellence en langages classiques, mais peut-être moins en distribué. Leader mondial pour le temps-réel critique (recherche et industrie), moins dans l'embarqués non critique. Equipes peu nombreuses mais fortes pour la programmation Web / smartphones / tablettes, un sujet majeur pour l'avenir à développer prioritairement.*

Actions proposées : *développer la recherche sur les langages pour la programmation distribuée ; étendre le leadership sur le temps-réel critique à des applications plus distribuées et des domaines plus variés (médical par exemple). Développer les moyens de sortir de la tour de Babel des langages et outils Web / smartphones, en promouvant les idées originales déjà présentes en France sur le sujet.*

Techniques de compilation et mécanismes d'exécution

Les techniques de compilation avancées sont indispensables pour que tout le travail sur les langages de programmation entre en pratique. Si la compilation des langages classiques est bien maîtrisée, celle pour les langages parallèles et les architectures distribuées demande encore beaucoup de travail.

- Compilation pour multicœurs, avec modèles d'accès mémoire variés. Compilation just-in-time, recompilation et réoptimisation dynamiques.
- Compilation directe de programmes en circuits, compilation conjointe matériel / logiciel.
- Ordonnancement, placement et reconfiguration de tâches à l'exécution, statiquement ou dynamiquement.
- Garanties de performances à l'exécution (WCET = Worst Case Execution Time, etc.).

Etat en France : *La compilation multicœurs est déjà bien développée en partenariat recherche / industrie. La conception conjointe matériel / logiciel a fait des progrès récents avec la compilation directe en circuits de C / SystemC devenue industrielle aux USA. Les*

meilleures techniques de WCET s'appuient sur l'interprétation abstraite mais sont pour l'instant limitées aux programmes séquentiels.

Actions proposées : *développer la compilation multicœurs et l'analyse de performance associée (moyenne ou WCET) en priorité, puis la spécification et la compilation conjointe matériel / logiciel et la garantie de performances en fonction des besoins industriels en systèmes sur puce et multicœurs.*

Mécanismes d'exécution et systèmes d'exploitation

L'ensemble des recherches françaises en technologies logicielles a aussi des applications au sein des Systèmes d'Exploitation. Pour autant, la France n'a pas pris de position industrielle majeure dans l'écosystème des OS, qui reste par chance fragmenté. Les cycles d'innovation peuvent être courts et avec des initiatives en logiciel libre. Les OS sont un moyen de contrôle par dissémination ou hybridation vers les matériels. L'étendue de la portabilité des OS s'élargit vers l'automobile les micro-systèmes et les nouveaux objets numériques.

- Noyaux d'OS généraux ou spécifiques (embarqués, micro-OS, etc.)
- Machines virtuelles et virtualisation de l'exécution, lien avec les systèmes d'exploitation.
- Configuration et déploiement de système, détection de services.
- Développement et certification des pilotes.

Etat en France : *étudier où et comment investir dans les niches OS d'avenir. Continuer à développer les techniques de virtualisation de l'exécution. Développer les techniques récentes de vérification formelle des pilotes, points faibles de beaucoup de systèmes.*

Génie logiciel

Les logiciels et les descriptions de circuits sont de très gros objets techniques évoluant à un rythme élevé. Leur gestion et leur évolution doivent faire appel à un outillage dédié, dont une partie importante est déjà standard, mais loin d'épuiser le sujet :

- Outils de gestion des systèmes logiciels (versions, configuration, cohérence, mise à jour, etc.), industriellement disponibles.
- Outils de traçabilité, centraux pour la certification des systèmes logiciels, à rendre plus génériques.
- Outils de visualisation, d'analyse et de diagnostic de l'exécution, particulièrement pour la programmation système, la programmation parallèle ou distribuée et la programmation Web.
- Outils de génération de tests de programmes et systèmes.
- Outil de mise à jour et de maintenance automatique de gros codes en fonction de changements locaux (ex. changement d'APIs).

Etat en France : *Des outils de traçabilité, de visualisation, de diagnostic et de génération de tests ont été développés dans plusieurs équipes ; ne action intégrative spécifique joignant chercheurs et industriels sur ces sujets serait utile. La maintenance automatique de codes est clairement un sujet d'avenir, avec d'excellentes équipes en France. A étendre dans l'industrie.*

1.3 Outils pour l'architecture de systèmes

Méthodes et outils pour l'architecture

L'architecture de systèmes complexes fait appel à de nombreuses compétences, qui doivent se refléter dans les outils.

- Méthodes de construction d'architectures distribuées, hiérarchiques, ouvertes et évolutives, par compositions de composants et de services, pour les systèmes d'information, les systèmes embarqués, les applications interactives, et toutes les autres applications informatiques.
- Langages et méthodes de spécification d'exigences et de description à haut niveau d'architectures matérielles, logicielles et de systèmes d'information dans leurs aspects fonctionnels ou non fonctionnels (qualité, sécurité, énergie, aspects économiques, etc.).
- Langages et outils pour le prototypage virtuel, l'évaluation de performances et la validation d'architectures logicielles et matérielles.
- Architectures pour la sûreté de fonctionnement et la tolérance aux pannes et aux pertes de précision ou d'échéances.
- Prise en compte anticipée des progrès technologiques, en particulier pour l'optimisation énergétique.
- Compréhension des rapports entre une architecture et ses utilisateurs divers (forte relation avec le chapitre Interactions).

Etat en France : *moyen pour les langages d'architecture et de spécification fonctionnelle, mais ce sujet n'a pas encore donné ce qu'on aurait pu en attendre au plan mondial. Les aspects non-fonctionnels restent embryonnaires et doivent être développés. Le prototypage virtuel par simulation gros grain est classique pour les systèmes de télécommunication et le devient pour les systèmes électroniques sur puce, mais doit être étendu à des architectures plus généralistes.*

Actions proposées : *Ces sujets très pluridisciplinaires et souvent très métiers restent difficiles à appréhender par les chercheurs, en particulier pour les aspects non-fonctionnels, mais des approches coopératives plus systématiques et outillées pourraient et devraient être développés en partenariat recherche / industrie dans des secteurs précis à forte composante métier : grandes architectures systèmes, systèmes d'information en gestion, embarqué, télécom, systèmes sur puce, etc. L'optimisation énergétiques est cruciale partout et demande de coordonner tous les acteurs.*

Méthodes et outils de simulation

La modélisation mathématique et la simulation informatique sont essentielles aussi bien dans les développements industriels qu'en recherche scientifique. Elle est de plus en plus indispensable aux études d'architecture.

- Outils mathématiques génériques et bien définis sémantiquement pour la simulation de comportements discrets ou continus. Un problème central est la relation entre temps discret et temps continu, généralement mal traitée par les outils (sujet en lien avec l'automatique et le traitement du signal).
- Simulation de systèmes physiques et multi-physiques : méthodes et outils d'analyse numérique statique ou dynamique ; simulation de systèmes biologiques ; moteurs de simulation temporelle. Modélisation multi-échelle, génération de maillages (adaptation, raffinement automatique, maillage mobile ou déformable).

- Simulation rapide de systèmes sur puce, indispensable pour le développement de leurs logiciels avant même l'existence du circuit.
- Simulation comportementale de grands réseaux de communication ou d'objets, pour étudier leur correction et leurs performances.
- Couplage de simulateurs hétérogènes, difficile à rendre juste à cause de la coexistence nécessaire de diverses visions du temps et de divers modes de simulation.
- Instrumentation de mesure des aspects non-fonctionnels.

Etat en France : *La partie analyse numérique est historiquement très forte ; la partie systèmes sur puces est très forte avec un gros investissement de ST Microelectronics en liaison avec la recherche universitaire (TLM = Transaction-Level Modeling). La simulation est également forte en télécoms.*

Actions proposées : *Tous les sujets cités ci-dessous sont pertinents et doivent être développés. Mieux relier la simulation numérique au génie logiciel classique et à la vérification formelle ; continuer l'investissement sur la simulation TLM de circuits et étendre son champ d'application aux systèmes physiques, à la CAO industrielle, etc. Démarrer des actions partenariales sur les couplages de simulateurs pour mieux comprendre les problèmes sous-jacents et proposer des solutions propres. Pour la liaison continu / discret, de nouvelles solutions sont apparues récemment en France, qui méritent d'être poursuivies avec les acteurs industriels du domaine et les fournisseurs de simulateurs mathématiques.*

Tolérance aux fautes et diagnostic

Les architectures tolérant les fautes matérielles ou capables de se reconfigurer en cas de telles fautes sont essentielles dans les applications critiques ; voir par exemple les calculateurs redondants sans horloges communes avec voteurs dans les transports, le passage à des modes de secours en cas de détection de problèmes graves, les codages redondants en télécommunications, etc. Les difficultés récentes de la loi de Moore suggèrent le développement d'architectures matérielles tolérant automatiquement les fautes à plus bas niveau, ainsi que d'architectures de nature différente pour les calculs plus probabilistes. La tolérance aux fautes peut aussi être une préoccupation proprement logicielle : passage en mode dégradé mais sûr en cas de détection d'incohérence des données, utilisation de redondance logicielle dissymétrique, etc.

La tolérance aux fautes suppose la construction de systèmes de diagnostic fiables, et de modèles statistiques dépendant des applications et difficiles à construire. Ces systèmes de diagnostic sont également fondamentaux pour la détection de problèmes de correction ou de performance dans les systèmes distribués.

Etat en France : *si la redondance matérielle est assez bien comprise, la redondance logicielle reste très discutée. Plusieurs équipes travaillent dans le diagnostic pour les systèmes distribués.*

Action proposée : *la tolérance aux fautes et le diagnostic en général sont des domaines à approfondir car essentiels pour les systèmes du futur.*

1.4 Logiciels pour l'interaction homme-machine

Les interfaces homme-machine sont en pleine évolution, en particulier avec le retour bienvenu du corps humain qui permet une floraison de nouvelles approches. Dans tous les cas, les logiciels associés sont techniquement complexes. Ils ont souvent fait progresser directement les langages et techniques de programmation, par exemple par l'introduction de

la programmation objet. Le développement des systèmes est du rôle du chapitre interactions, mais des questions typiques du chapitre logiciel se posent aussi :

- Logiciels de traitement de la langue : analyse et synthèse, interaction vocale traduction, etc. (sujet relié à des questions fondamentales sur la linguistique et les algorithmes d'apprentissage et les méthodes statistiques afférentes).
- Logiciels d'IHM professionnels spécifiques demandant des certifications normatives et des validations formelles : cockpits d'avion, conduite d'usine, contrôle aérien, etc.
- Couplage de techniques exactes et de techniques d'apprentissage pour les interfaces.

***Etat en France :** Plusieurs excellentes équipes dans le sujet, et pour le monde professionnel et pour les applications générales. Un sujet qui ne cesse de confirmer son importance, parfois déterminante dans des secteurs très importants (par exemple, cockpits électroniques soumis à certification, ou encore remplacement des PCs par les tablettes). Mais il reste beaucoup trop d'interfaces particulièrement pénibles ou mal conçues dans les objets informatisés, par exemple en domotique, ce qui est dommage vu la place de leader de notre industrie dans l'équipement électrique.*

***Actions proposées :** Couplage avec le chapitre interface. Actions partenariales spécifiques sur la certification et la validation d'interfaces industrielles de haute sécurité.*

1.5 Questions générales

Ces questions générales apparaissent dans une section à part car elles ne concernent pas que ce chapitre et devront probablement être fondues avec des questions similaires posées par les autres chapitres.

Web sémantique. La multiplicité des conférences (DocEng à Télécom ParisTech en 2012, SMAP en 2013, SemWeb Pro en 2012, etc.) organisées en France montre l'importance du sémantique dans la recherche française, appuyée par des projets gouvernementaux comme SemanticPedia, ou par l'intérêt de certaines institutions (BnF, Centre George Pompidou, etc.). Il y a une forte implication de la communauté scientifique concernant la création et l'évolution des standards du Web Sémantique (RDFa, SPARQL, OWL, etc.). L'intérêt des entreprises est loin d'être négligeable avec des connexions de plus en plus fréquentes entre recherche et entreprises (EDF, Renault, Airbus), valorisées le plus souvent par des thèses CIFRE, et avec des startup en bonne santé et ayant une bonne visibilité (Syllabs, Kwaga). »

Formation. L'absence totale d'enseignement de l'informatique en général et de la programmation en particulier avant le supérieur est un vrai problème pour l'industrie, dénoncé dans le monde entier, et particulièrement flagrant en France. De plus, un enseignement professionnel tardif et trop spécialisé nuit à la pérennité des compétences, car les techniques et les modes évoluent vite. Que ce soit pour la formation initiale ou pour la formation professionnelle, il faut que la formation soit suffisamment forte sur les principes généraux, les méthodes algorithmiques et les styles de langages et de systèmes principaux, qui sont eux bien plus pérennes. Enfin, comme l'encourage le Ministère, le doctorat doit devenir mieux reconnu dans l'industrie française, au niveau où il est reconnu en Allemagne ou aux USA, car il apporte une formation bien plus large et pérenne que les formations initiales.

Comment passer à la production, pas seulement à la R&D industrielles. Un des enjeux et une des grandes difficultés pour les chercheurs de la recherche coopérative est de travailler directement avec de vraies unités de production, soit de PME soit de grands groupes, en ne limitant pas comme souvent ses collaborations à la R&D de grands groupes. C'est indispensable pour connaître les vrais problèmes industriels dans leur vraie taille, ainsi que les façons de penser et de procéder des divers services de production et des PME, que les

chercheurs ignorent souvent par manque d'exposition directe. Toute action permettant d'augmenter ce type de perméabilité est bienvenue.

Standards et normes. La participation à des organismes de standardisation est une question délicate pour le logiciel, où les standards de faits sont souvent plus importants. Elle peut être fondamentale là où on ne l'attend pas forcément, comme pour le sujet très technique qu'est le calcul flottant, et plus mineure dans les endroits où il y a beaucoup de mousse sur assez peu de bière, comme dans les dizaines d'actions UML (dont certaines sont quand même fort utiles pour l'industrie). Il convient donc de bien trier les participations et d'en mesurer l'impact réel ou potentiel, car elles sont toujours chronophages.

Logiciel libre. Nous avons choisi de ne pas traiter les questions logiciel libre / logiciel propriétaire et open source car aucun consensus n'aurait pu être atteint dans le temps imparti, et car ce sujet reste assez indépendant de la nature scientifique et technique des logiciels concernés.

Compléments sur les bases de données non-SQL. Depuis quelques années, de nouvelles approches du stockage et de la gestion des données sont apparues, qui permettent de s'astreindre de certaines contraintes, en particulier de scalabilité, inhérentes au paradigme relationnel. Regroupées derrière le vocable NoSQL, ces technologies, portées par des acteurs majeurs du Web comme Google, Facebook, Twitter, ont rapidement acquis une légitimité réelle dans le domaine de la manipulation de volumétries de données très importantes et ont rapidement gagné tant en maturité qu'en notoriété.

En effet, les SGBD relationnels ne sont pas adaptés aux environnements distribués requis par les volumes gigantesques de données et par les trafics tout aussi gigantesques générés par les opérateurs.

Dans la mouvance NoSQL, les grands noms de la base de données propriétaire brillent par leur absence, les solutions citées ci-dessus étant soit open source, soit proposées en SaaS.

Les produits open source constituent la majorité de l'offre NoSQL, et l'on assiste à une réelle montée en de ces solutions dans ce secteur, souvent portée par des contributeurs importants comme Facebook, Twitter, LinkedIn, ... Un certain nombre de produits ont été développés pour les usages internes de ces grands acteurs de l'Internet, puis libérés dans des états d'avancement très important, puisque déjà en production pour ces grands sites web. Notons que la fondation Apache joue ici encore un rôle primordial dans ces projets.

2. Formation numérique de masse

En observant les évolutions récentes de l'enseignement à distance, on est amené à penser qu'un changement probablement assez radical est sur le point de se produire, mettant en œuvre des outils et approches basés sur des médias numériques faisant intervenir le réel et le virtuel, utilisant des supports de cours et de communication multimédia et s'appuyant sur des modalités d'interaction nouvelles : réseaux sociaux, simulations de type jeux sérieux... En passant à l'ère du numérique, la diffusion de la science et de la culture s'est accélérée de façon considérable, mais elle s'est également complexifiée en offrant, outre les corpus académiques classiques, une masse de connaissances brute, produite notamment par tout un chacun (ex de Wikipedia). Les bibliothèques numériques remplacent progressivement les bibliothèques traditionnelles (réduites à l'archivage de pièces originales ou rares), les Moocs se substituent progressivement aux supports de cours académiques, et la navigation en ligne supplante le processus fastidieux de recherche et de collecte documentaire. Cette transition vers un accès ouvert et massif au savoir devient une vraie tendance de fond, et pourrait s'avérer un canal de convergence de tout un pan de la recherche dédiée aux méthodes pédagogiques. L'ingénierie pédagogique émerge comme une discipline d'organisation du savoir, d'intégration des technologies et de médiatisation des contenus à travers ces technologies.

L'éducation et la formation tout au long de la vie seront organisées autour de plateformes spécialisées qui assureront la médiation entre l'enseignant et l'apprenant. Loin de remplacer l'enseignant, les contenus pédagogiques numérisés, massivement distribués, changeront de façon progressive mais significative l'interaction enseignant-apprenant ; on passera d'un modèle de distillation du savoir à un modèle d'accès multimodal à ce savoir, l'enseignant étant l'une des modalités. D'autres formes d'élaboration et d'acquisition du savoir émergent déjà avec le développement de communautés virtuelles et de réseaux sociaux. A l'ère du web, c'est une appropriation « pour tous » qui se met en place avec des questions nouvelles et des réponses à inventer dans un contexte technologique et social dynamique. En particulier, le contexte de concurrence internationale entre organismes de formation encourage une dynamique de diffusion large des contenus pédagogiques, motivée par des stratégies de marques d'établissement parfois centenaires et de re-conception des modèles économiques de ces organismes.

L'émergence de cours en ligne ouverts et massifs, débutée en 2001 au MIT, a lancé l'Open CourseWare (**OCW**) et conduit à la création du consortium OCWC avec plusieurs centaines d'établissements. Ce consortium reste une référence normative. En 2008, Stanford lance le programme «Stanford Engineering Everywhere» d'où émerge la notion d'apprentissage collaboratif qui prend le nom générique de **connectivisme**, et donne naissance au mouvement des «Massively Online Open Courses» (**MOOC**). Depuis, de prestigieux établissements ont poursuivi cette dynamique, devenue entre-temps sociale (et ainsi connectiviste). Des plateformes sont apparues aux Etats-Unis (Coursera, Udacity, EdX...), et les modèles s'exportent, avec en France des projets comme Itypa. De son côté, le pure-player Simple IT accueille aujourd'hui 140000 étudiants chaque mois sur son cours de création de sites web. L'Espagne a déjà lancé une plateforme autour d'un logiciel open source, OpenMooc. Cette dynamique de grands groupes sociaux va bien au-delà des campus où peuvent être initiées ces plateformes, le nombre d'étudiants sur certains cours pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers¹.

¹ Exemples : les premiers MOOCs de Edx auraient rassemblé 370 000 étudiants à l'automne 2012, et 140 000 étudiants chaque mois sur le Site du Zéro sur le seul cours de création de sites web.

Les bases de connaissances, l'analyse et la décision, l'interaction homme-machine dans un environnement intégrant mondes physiques et mondes virtuels deviendront les nouveaux supports de l'ingénierie pédagogique. La formation des élèves à ces nouvelles technologies constituera alors l'éducation primaire, indispensable à l'acquisition d'autres savoirs.

Etant donné l'importance que prend l'informatique dans tous les métiers de l'industrie, des services, de la recherche, de la culture, etc., il est indispensable qu'elle soit bien utilisée et développée par et pour tous les acteurs. Or, quand on parle de formation pour le numérique, on se limite souvent à la formation aux usages des matériels et logiciels informatiques divers. Cette approche est bien trop limitative, comme l'affirme le récent rapport de l'Académie des sciences, « Enseignement de l'informatique, il est urgent de ne plus attendre ». En effet, elle revient à dire que les acteurs se positionneront essentiellement en termes de consommateurs de ce qui est conçu et fabriqué ailleurs, à l'opposé de la position d'avenir au plan mondial qui est celle de créateur et d'inventeur. Comme dans toutes les disciplines, la généralisation d'un vrai enseignement de science informatique est indispensable pour atteindre cette position créatrice. Or, pour l'instant, l'informatique n'est enseignée que dans le supérieur, et est presque absente de l'enseignement général et peu présente dans la formation continue, devenue indispensable pour le développement personnel dans la plupart des métiers. Mais les choses bougent, avec en particulier la généralisation à toutes les terminales de l'enseignement optionnel « Informatique et sciences numériques » et l'introduction d'un enseignement de science informatique dans les classes préparatoires aux grandes écoles. Les curricula, manuels et situations expérimentales de ces enseignements ont été conçus en partenariat fructueux entre chercheurs des grands organismes, enseignants et inspecteurs généraux. Ce cercle vertueux associant enseignement et recherche devra s'élargir à l'enseignement à tous les âges, du primaire à la formation continue. Il est considéré comme un défi primordial pour l'avenir.

2.1 Défis en formation

Les défis en formation sont de quatre ordres : **technologique** (développement et déploiement de plateformes, gestion de contenus, interfaces multimodales), **methodologique** (ingénierie pédagogique, conception de contenus, évaluation des acquis), **économique** (coût, retour sur investissement), et **sociétal** (droit d'accès au savoir, valorisation individuelle, veille scientifique et technique).

Défis technologiques : Il est essentiel de **maîtriser les technologies et les plateformes** de développement de l'offre pédagogique, notamment pour les MOOCs, pour être en mesure de les adapter à des usages originaux, innover pédagogiquement sans dépendre d'un acteur tiers. L'utilisation et la collaboration autour de projets **open source** doivent être privilégiées dans cette perspective pour favoriser la co-production d'outils et de contenus. Une attention particulière doit être portée aux problèmes d'**interopérabilité**, d'**ubiquité** et de **mobilité**. L'apprenant doit pouvoir accéder en tout lieu, à tout moment avec n'importe quel terminal client. La gestion de contenus, les outils de planification de cours, de guidage et de contrôle de l'apprenant doivent s'inscrire dans la problématique générale de la gestion de connaissances et de décision discutée dans la section A précédente. Au-delà, les avancées prodigieuses en **réalité virtuelle et réalité augmentée** permettent de proposer des expériences plus immersives (interaction, réalisme, temps réel), avec des interfaces haptiques et vibrotactiles améliorant l'apprentissage en proposant une intégration multi-sensorielle des informations (exemple du projet [JESTIMULE](http://www.jestimule.fr)²). Ces approches offrent enfin un contrôle total (ou presque) de l'environnement d'apprentissage, permettant de suivre le comportement et les

² <http://www.jestimule.fr/scripts/home/publigen/content/templates/show.asp?L=FR&P=55&vTicker=alleza>

performances de l'apprenant (exemple du projet SKILLS³). Ces environnements peuvent faciliter le recours aux techniques de **jeux sérieux** (applications basées sur des technologies issues du monde des jeux vidéo dont l'objectif principal est autre que ludique) développer des offres d'enseignement originales tant en enseignement de base, en formation professionnelle qu'en exercices d'entraînement. Cependant, malgré ce potentiel d'application considérable, les usages réels de cet ensemble de technologies sont encore assez restreints, puisque peu clairs et peu différenciés. Il serait donc primordial de développer de façon prioritaire la formation aux technologies du numérique, et ce tout au long des trois cycles d'enseignement, pour former une génération réceptive aux nouvelles technologies et à leurs usages.

Défis méthodologiques : L'ingénierie pédagogique s'appuie sur des modèles et des pratiques qui plongent leurs racines dans la culture et la civilisation du pays concerné, même si, dans certains domaines scientifiques et techniques, des approches génériques sont mises en œuvre de façon universelle. Les modèles de formation mixent l'apprentissage formel et informel à des degrés variables. L'illustration ou l'étude de cas peut ou non prendre le pas sur une approche théorique, privilégiant éventuellement la découverte de concepts à partir d'exemples ou stimulant l'imagination à l'aide de métaphores orales ou graphiques. La ludification des cours ou exercices par des interfaces immersives et des jeux sérieux collaboratifs, peut susciter la curiosité, augmenter la motivation, renforcer l'implication et conduire au plaisir d'apprendre. La prise en compte du contexte de l'apprenant, son activité passée, la personnalisation des contenus pédagogiques et leur adaptation au niveau de l'apprenant doivent permettre la conception de parcours ou de scénarios pédagogiques spécifiques. Le Suivi et l'évaluation en temps réel des apprentissages par des techniques d'analyse sémantique de contexte et de data-mining sont devenues courantes dans les secteurs clés du big data comme le marketing. Le retour d'expérience permet une évaluation et une analyse systématique des cours et des systèmes de formation pour permettre leur évolution.

Défis économiques : La formation devient un marché du numérique aux Etats-Unis. La structuration de ce marché en Europe reste plus problématique. Elle va sans doute modifier dans les années à venir l'ensemble des offres de formation, tant au niveau des apprentissages qu'au niveau des structures de formation. Économiquement, le financement de la production des contenus pédagogiques diffèrera fortement des modèles actuels, basés sur les heures en présentiel des enseignants. Encore largement en friche, les modèles économiques associés au MOOC sont principalement constitués du prix des certifications proposées, les contenus diffusés l'étant généralement gratuitement. D'autres types de recette sont envisagés : tutorat, sponsoring, publicité, livres et eBooks dérivés, abonnement à du contenu ou des services « premium », mise en relation entre étudiants et recruteurs, etc. Coursera a de son côté engendré 220.000\$ en certifications lors du seul premier trimestre 2013. Coursera retient 80% des ressources, ce qui aujourd'hui ne permet pas aux universités d'en faire une source de revenus pérenne. Ne pas amorcer de cours en ligne (au-delà de captation vidéo et de supports de présentation) présente un **risque majeur** dans l'attractivité des établissements. Une réflexion doit s'engager sur le coût de conception d'un MOOC par rapport à celui d'un module en présentiel, ciblant le même objectif pédagogique, en notant que la production d'un MOOC ne repose pas seulement sur un personnel éducatif mais aussi sur un personnel technique. Ce qui ne manquera pas d'impacter l'organisation même des formations dans les établissements. Par ailleurs, pour permettre aux entreprises d'accéder à ces nouveaux outils et méthodes, une **évolution de la réglementation autorisant le financement**, par les OPCA, **de formations numériques** non présentesielles est essentielle, pour les autoriser à former au mieux leurs salariés dans des contextes de plus en plus concurrentiels. Enfin, un cercle

³ [Teodorescu, K.; Bouchigny, S. & Korman, M. "Training haptic stiffness discrimination: Time-course of learning with or without visual information and knowledge of results" Human Factors, 2012]

vertueux est à initier en **formant aux technologies numériques** dès le plus jeune âge, pour former d'autant mieux avec le numérique.

Défis sociétaux : Il convient de faire émerger des **environnements d'apprentissages** exploitant les **compétences** françaises en sémantique pour assurer une représentation des contenus et des connaissances compétitive à l'échelle mondiale (ce qui permettra également de maintenir la validité des contenus dans l'économie de la connaissance), et en valorisant **les spécificités** culturelles propres à l'Europe, comme la création communautaire et la capacité à modifier et remixer les contenus existants. A terme, l'absence sur le marché de l'éducation numérique pourra être perçue comme un indicateur de régression pour un pays développé. Par ailleurs, la présence forte d'un pays sur ce marché n'est pas nécessairement synonyme d'un accès en masse à l'éducation et à la formation permanente s'il est verrouillé par un modèle économique dirigé par une rentabilité immédiate et directe. Il faut donc trouver un nécessaire équilibre entre secteur privé et secteur public où le retour sur investissement se mesure sur la durée, à l'échelle nationale, incluant de nombreux paramètres tels que l'augmentation générale des compétences et de la culture, la reconversion thématique pouvant satisfaire un marché dynamique, la veille scientifique et technique, etc.

2.2 Forces et faiblesses françaises

La recherche Française est engagée depuis longtemps sur ces problématiques (INRIA, CNRS, Mines Télécom,...) aussi bien dans les NTIC que dans les technologies pour l'éducation et la formation, et est fortement fédérée par la communauté EIAH (Environnement informatique pour l'apprentissage humain). De nombreuses initiatives MOOCs ont été lancées, et des projets de R&D sont déjà en cours sur la diffusion des contenus pédagogiques (adressant les enjeux du sémantique, du riche-média, l'évaluation auto-adaptative, la publication multi-supports), et les dimensions sensorielles de l'apprentissage. Si aucun acteur industriel national n'est à dimension internationale sur l'axe formation, le tissu (voir en annexe) est tout de même dense et est considéré comme innovant (13% de leur CA investi en R&D).

Néanmoins, ce tissu académique et industriel manque de visibilité au regard de ses avancées, et comme dans d'autres secteurs, la collaboration entre industriels et académiques est jugée insuffisante. Les établissements de formation sont peu enclins à financer la production de contenus numériques, plus chers à produire notamment parce qu'ils sont non séquentiels et requièrent de véritables laboratoires de montage et de production.

2.3 Recommandations

Nos recommandations s'articulent autour des principaux défis dégagés précédemment.

En enseignement du numérique

Faire de la maîtrise du numérique et de l'informatique un enjeu majeur de la formation dès le plus jeune âge, au même titre que lire, écrire et compter,

Développer une culture du numérique chez les enseignants, allant au-delà de l'usage de base des outils, pour permettre à leurs étudiants d'apprécier toute la complexité et les enjeux liés à l'informatique et aux nouvelles technologies,

Mettre en place une politique incitative pour encourager les étudiants à choisir les métiers du numérique (informatique, robotique, automatique), afin de faire face au manque cruel de personnel qualifié rencontré actuellement dans toutes les entreprises ;

Technologie et plateformes

Développer une expertise technique forte autour d'une ou deux plateformes open-source adaptées aux formations numériques de masse (MOOCs). Développer une stratégie de déploiement de ces plateformes sur les différents territoires académiques (formation de base,

formation par alternance, et formation universitaire) et dans les entreprises (formation continue, entraînement intensifs, ...)

Développer des interfaces d'apprentissage dynamiques exploitant des situations de jeu de rôle (jeux sérieux, ou « serious games »), en prenant notamment en compte la multiplicité des formats et des supports d'apprentissage dans un contexte de mobilité ;

Mettre en place une politique d'innovation incitative permettant aux équipes de recherche tant SHS que STIC, de développer des technologies de pointe et d'en assurer le transfert dans l'e-Education.

En ingénierie pédagogique

Remettre au centre de l'e-Education l'ingénierie pédagogique comme une méthode intégrative de compétences interdisciplinaires, dans le but de revisiter les cursus pédagogiques et d'en inventer de nouvelles formes d'acquisition du savoir. L'expérimentation d'une pédagogie inversée permettant aux élèves d'apprendre à leur rythme, aussi bien sur leur lieu de formation qu'à la maison, avec des outils adaptatifs ;

Mettre en place des procédés de ludification des formations numériques pour encourager et valoriser l'apprentissage autonome afin d'en faire un challenge personnel plutôt qu'une contrainte ;

Personnaliser au cas par cas les parcours pédagogiques des apprenants à l'aide des informations issues de l'analyse sémantique de contexte

En gestion des contenus

Développer des contenus pédagogiques de grande qualité exploitant des fonctionnalités multimédia interactives engageantes, et offrant une indexation intelligente permettant à l'élève une découverte ou une navigation aisée dans les contenus ;

Encourager la création d'histoires (storytelling) basées sur des exemples au sein des scénarios pédagogiques multimédia. La technologie de Web services peut être mise à profit pour développer des techniques de scénarisation des cours, de composition de fragments de connaissances et d'orchestration d'un processus pédagogique.

Modèle économique

A court terme, investir dans le marché des MOOCs pour que la visibilité des formations françaises ne soit noyée dans l'offre américaine, elle-même déjà très conséquente en ligne ;

Dans les budgets, prendre en compte les coûts spécifiques de création d'un MOOC, plus élevés que ceux d'un cours traditionnel (le MOOC pouvant être amorti sur une plus grande durée et devant un plus grand nombre d'apprenants en compensation) ;

Développer un modèle économique pérenne grâce aux certifications et diplômes en ligne, aux produits dérivés (livres, eBooks...), au sponsoring et à la mise en relation entre étudiants et recruteurs. Le paiement des formations ainsi offertes est une décision politique qui peut être ajustée en fonction de la cible (formation de base, formation technique, formation continue, formation par la recherche, ...)

Faire évoluer la réglementation des OPCA pour prendre en compte les formations numériques et permettre l'expansion, au sein des entreprises, de la formation tout au long de la vie et de la reconversion thématiques des personnels.

ANNEXE

Acteurs Industriels identifiés sur l'éducation et la formation numérique :

4n Media Group, Abilian, Alterway, CGI, Educaweb, Edupad, eInstruction, Encyclopaedia Universalis, GEDEM, GIE lesite.tv, Iobjects, Itop Education, Jeulin, Knowmore, Kosmos, KTM Advance, Microsoft, Milliweb, myBlee, Neotis, Orange, PM Conseil, Promethean, Simple IT, SNE (Groupe Education), TELL ME MORE, Texas Instruments, Tralalère, Unowhy, Viforma, WebServices Pour l'Education

Panorama des initiatives MOOC

- 2001, le MIT lance les Open CourseWare (**OCW**) ce qui donne lieu à la création du consortium OCWC avec plusieurs centaines d'établissements.
- 2008, Stanford lance le programme « Stanford Engineering Everywhere »
- Sur ce terrain, émerge la notion d'apprentissage collaboratif qui prend le nom générique de **connectivisme**, et donne naissance au mouvement des « Massively Online Open Courses » (**MOOC**)
- Le plus gros succès est celui de Stanford, 2012, avec **740 000 inscrits** à des cours d'informatique (Web, IA et Robotique).
- Les MOOC sont associées à des « **plateformes** » (Aux USA : Coursera, Udacity et maintenant celle du consortium Edx, avec sa plateforme open source)
- L'export du modèle est très rapide :
 - En France, c'est **Itypa** (Jean-Marie Gilliot) qui est le premier représentant de cette dynamique (1 300 inscrits au premier cours qui vient de s'achever).
 - L'Institut Mines Télécom a initié deux projets, et contribue à d'autres initiatives
 - De son côté, le pure-player Site du Zéro accueille aujourd'hui 140 000 étudiants chaque mois sur son seul cours de création de sites web.
 - L'INRIA est engagé sur deux projets, Fuscina et Utop
 - Le CNRS lance en 2013 un projet pilote avec l'ENS Lyon et l'université Lyon 1
 - L'Espagne a déjà lancé une plateforme autour d'un logiciel open source, OpenMooc.
 - L'Ecole Polytechnique participe au sujet, avec deux cours en mathématiques.

Projet JESTIMULE

JESTIMULE est un projet national concernant l'apprentissage d'émotions par des enfants avec autisme. Il a permis de valider des interfaces vibrotactiles ont, par exemple, été validées dans le cadre d'un.

Le CEA LIST a intégré de telles interfaces vibrotactiles dans un jeu sérieux présentant un certain nombre de scénarios d'interactions sociales et visant l'apprentissage et la compréhension d'émotions exprimées par des avatars.

Projet SKILLS

Il s'agit d'un projet européen où le CEA LIST a montré l'intérêt de supprimer certaines modalités dans l'apprentissage du geste. Publications :

[Teodorescu, K.; Bouchigny, S. & Korman, M. "Training haptic stiffness discrimination: Time-course of learning with or without visual information and knowledge of results" Human Factors, 2012]

[Bouchigny et al. "Designing a VR training platform for surgeons: theoretical framework, technological solutions and results" Taylor & Francis, 2012]

Divers

search: Open Search Server, Exalead, Polyspot, Andidot, Sinequa...

sémantique : Temis, Tagmatica, Proxem, Celi, Mondeca,

Géodashboard : Tibco

RSE: Abilian, Jamespot, Netvibes / Dassault Système, Xwiki, Yoolink, Knowings, Talkspirit, Silverpeas, etc.

3. Sécurité de la Société Numérique

3.1 Impact social et sociétal de la sécurité numérique

Les enjeux stratégiques de la sécurité numérique sont liés aux considérations sociales, sociétales et économiques représentatives de nos sociétés dans leur migration vers une dématérialisation de plus en plus poussée de leurs activités. Cette évolution s'effectue dans un environnement caractérisé par plusieurs tendances de fond :

Le développement de « mégapoles » ou « corridors » dans lequel la vie d'un grand nombre de citoyens dépend de plus en plus étroitement du fonctionnement optimal d'un certain nombre d'infrastructures vitales.

Les problèmes SSI et de sécurité globale posés par l'optimisation des infrastructures de transport, de distribution d'énergie, de communication et souvent leur interpénétration pose de manière cruciale la question de la vulnérabilité, de la résilience et de la sûreté de fonctionnement de ces infrastructures.

Le développement des usages du numérique qui implique une augmentation des besoins de sécurisation informatique et le renforcement de la confiance des différents utilisateurs dans les systèmes mis à leur disposition.

Cette demande en matière de confiance et sécurité numérique touche aussi bien les professionnels que le grand-public : il y a là en particulier des enjeux sociétaux importants touchant aussi bien à la frontière entre vie professionnelle et vie privée, qu'au développement de transactions et relations de toute nature (B2B, B2A, G2C, C2C, M2M) qu'une approche purement technique conventionnelle ne saurait satisfaire (pour résoudre les problèmes de « fracture numérique », protection de la propriété intellectuelle, neutralité de l'internet ou protection des mineurs pour ne donner que quelques exemples...).

Les grandes tendances qui vont directement impacter cette demande de confiance et sécurité informatique sur les domaines d'activités tels par exemple que l'e-santé, les systèmes de transports intelligents, le développement de l'e-gouvernement ou encore les nouvelles architectures de service informatique sont en particulier conditionnés par:

- **Une forte croissance de la mobilité à travers l'essor des terminaux mobiles connectés (smartphones, tablettes, etc) et de leurs usages**

Le XXIème siècle sera en particulier le siècle de la fin de « l'ère du tout PC », avec de nouveaux enjeux de sécurité lié à la multiplication constante des types de terminaux d'accès et de mode de connexion associés (BYOD pour ne citer qu'un des exemples les plus critiques).

- **L'ouverture des systèmes d'information (SI) qui génèrent de nouvelles menaces informatiques**

De nouvelles menaces informatiques se développent, qui vont devoir être maîtrisées et contenues. Ainsi la cybercriminalité internationale qui est en croissance forte selon toutes les dernières études disponibles (Cisco, Clusif...), voire même les risques de cyberguerre, deviennent un enjeu de sécurité nationale.

- **La dématérialisation croissante des échanges de données et de flux dématérialisés entraînant une explosion quasi exponentielle du nombre de données**

La maîtrise de la capture, de l'agrégation, de la « fouille » intelligente (Big Data, « Advanced Analytics »), et/ou sécurisée ou anonymisée du stockage des données dans des espaces faiblement structurés (NoSQL) sera l'un des enjeux majeurs de la sécurité des systèmes numériques dans la prochaine décennie, en particulier vis-à-vis des positions technologiques agressives prises par les majeurs de l'internet dans ce domaine (GAFA : Google, Apple, Facebook, Amazon,...).

- **Le développement des réseaux sociaux**

Facebook compte aujourd'hui plus de 1 milliard d'utilisateurs (soit plus de trois fois la population des Etats Unis) et en France par exemple, le nombre de réseaux sociaux utilisés par les internautes a augmenté de plus de 50% en un an. Cet engouement pour les réseaux sociaux pose de nouveaux problèmes sur les espaces de confiance numérique, y compris en environnement professionnel, impliquant une nouvelle démarche multi-disciplinaire dans laquelle sciences pures et sciences humaines et sociales doivent trouver un nouvel équilibre. Il convient également de considérer le rôle des réseaux sociaux comme fournisseurs d'identité numériques. De telles identités permettent des opérations que n'offrent pas les identités traditionnelles fournies par les états. Ainsi, on peut citer à titre d'exemple les actions transnationales en ligne ou les preuves de réputation.

- **La numérisation des contenus culturels**

Les contenus culturels : vidéo, audio, jeux, livres, existent de plus en plus sous forme numérique. Cette numérisation intervient à toutes les étapes de la vie des contenus : captation, transformation, stockage, diffusion, archivage) et pose la question de leur sécurité. Cette question va bien au-delà-du seul piratage et concerne aussi les fraudes à la mesure de diffusion, les difficultés de respecter des limites d'âge ou de territoire, les limites de la réutilisation de contenus générés par les utilisateurs, etc.

- **Le développement de l'informatique dans le nuage (*informatique* ou *cloud computing*)**

Outre des problèmes techniques complexes, le Cloud Computing pose également des questions extrêmement sensibles, par exemple de souveraineté, mais aussi d'acceptabilité par les utilisateurs, de performance, de capacité à supporter des concepts de nature maîtrise des données privées (localisation, contrôle, droit à l'oubli,..). L'utilisation de cloud public et bon marché (mutualisé) introduit de nouveaux modèles de menace et de dépendance, en particulier la question de la réversibilité.

3.2 Perspective 2020-2025 du secteur

Grands besoins au niveau national et dans une perspective Européenne

Protection des infrastructures critiques dans la ville numérique. Le domaine des infrastructures critiques continuera à livrer des alertes inquiétantes. L'ampleur de la problématique est mieux prise en compte par le monde politique, mais concernera également les entreprises qui devront mettre en œuvre des régulations techniques et des règles de bonne pratique concrètes et précises. Il faudra inventer des mécanismes pour mieux savoir estimer les vulnérabilités dans ce secteur nouveau, notamment pour démêler l'interconnexion complexe entre les différents niveaux concernés (infrastructure, service, business) des LCCIs

(*Large Critical Complex Infrastructure*)/acteurs impliqués. La compréhension de ces interconnexions et dépendances devra fournir des mécanismes techniques qui respectent d'un côté la souveraineté numérique des Etats mais aussi l'intégrité des personnes morales telles que les entreprises.

Cybersécurité et stratégies associées.

L'informatique connaît aujourd'hui une évolution vers des environnements de plus en plus ouverts, distribués et interconnectés avec des infrastructures physiques et critiques pour le fonctionnement des Etats-nations. Cette tendance forte et inexorable va s'accompagner d'un accroissement très significatif des vulnérabilités et d'une explosion des attaques ciblant ces environnements. Toutes les composantes de notre société seront concernées depuis les utilisateurs consommateurs jusqu'aux grandes infrastructures vitales pour les Etats en passant par les services informatiques des petites et grandes entreprises. Des attaques ciblées telles que Stuxnet ou Flame ne constituent que les prémices de cette évolution et la partie visible de l'iceberg. Dans ce contexte, des études doivent être menées pour analyser les stratégies et les tactiques de guerre informatique (*cyberwarfare*). Au niveau militaire, les doctrines de défense développées depuis la fin de la Seconde Guerre Mondiale reposent en grande partie sur le principe de dissuasion, la menace de représailles devant être suffisamment élevée pour dissuader les attaquants potentiels. Dans un contexte de guerre informatique, ces doctrines doivent être repensées aux niveaux stratégique et tactique. Des processus autonomes de réaction doivent être conçus pour permettre aux systèmes de réagir de façon coordonnée tout en assurant la préservation des communications et fonctions vitales. Des plateformes doivent être déployées pour simuler les stratégies et tactiques de guerre informatique et tester la résilience des infrastructures ciblées.

Sécurité du Cloud et de l'Internet des Objets.

Le Cloud Computing d'un côté et l'Internet du Futur de l'autre se rapprocheront et convergeront à terme vers des problématiques de sécurité communes. Le Cloud Computing (comme L'Internet des Objets et le M2M), après une phase de consolidation, cherchera une décentralisation, principalement à cause des problèmes de coûts des opérateurs. Apparaîtront alors les problèmes liés à la distribution, l'externalisation et l'hétérogénéité des données et du code de traitement de ces données. L'usage de machines distantes et potentiellement partagées fera augmenter de manière inquiétante les risques que l'on sera obligé de prendre. Ces risques seront de plus en plus dépendants du comportement des parties impliquées et non plus seulement des infrastructures utilisées.

Sécurité des données externalisées. La sécurité est incontestablement l'un des enjeux principaux pour l'acceptation de toute solution visant l'externalisation des données ou de services sensibles. Le grand public a également besoin que ses données personnelles soient protégées, et ce quel que soit le contexte d'application (transactions de nature privée, e-commerce ou régaliennes, M2M, Internet des Objets).

Protection de la vie privée

Les technologies de l'information ont envahi de nombreux aspects du quotidien des individus, créant de nouvelles opportunités mais soulevant aussi des problématiques importantes en termes de vie privée et de confiance. D'une part, une grande partie de l'économie numérique actuelle tourne autour de l'exploitation des données personnelles des utilisateurs des technologies de l'information, qu'on compare d'ailleurs parfois au « pétrole du web ». D'autre part, bien qu'étant un droit fondamental de tout individu, la protection de la vie privée des citoyens devient de plus en plus difficile à protéger de notre « Société de l'information »

où chaque personne laisse constamment des « traces numériques » qui peuvent être reliées à son identité, parfois même sans en être conscient. Si toutes ces traces sont collectées par une entité non-autorisée, elle peut l'utiliser à des fins frauduleuses allant du pourriel ciblé en passant par le profilage ou encore l'usurpation d'identité. Ainsi, nous sommes dans la situation où il y a eu en 2012 en France plus de cas d'usurpation d'identité (400 000 environ suivant l'ONDRP) que de cambriolages physiques (352 000 Etude CSA) et d'après des études récentes ce phénomène ne devrait faire que s'amplifier. Ces risques contribuent eux-mêmes à diminuer la confiance des utilisateurs envers les technologies de l'information en leur donnant l'impression d'avoir perdu le contrôle sur leurs données personnelles. Afin de restaurer cette confiance, un changement de paradigme permettant aux individus de retrouver leur souveraineté sur leurs données semble nécessaire.

Sécurité des systèmes d'identification et d'authentification

Les technologies d'IAM (Identity and Access Management) constituent une composante essentielle de la stratégie de sécurité des entreprises et des administrations. Selon l'analyste Gartner, environ 8% de leur budget consacré à la sécurité concernent l'IAM. Malgré la crise économique actuelle, l'intérêt pour les technologies marché de l'IAM reste stable et garde une priorité élevée parmi les autres technologies liées à la sécurité. Dans ce domaine, un point particulier concerne les systèmes biométriques de grande taille qui commencent à être déployés, par exemple dans les Passeports, Carte Nationale d'Identité, ou recensement de la population indienne (avec des réflexions également en cours chez les grands majeurs de l'Internet-Apple, Google entre autres-). La mise en place de tels systèmes nécessite des efforts de recherche en termes de passage à l'échelle (Comment prédire les performances de reconnaissance à partir d'une base de données représentative de taille raisonnable ? Comment indexer et rechercher les identifiants biométriques dans de telles bases de données ?). La sécurisation de ces systèmes nécessite de prendre en compte le caractère sensible et privé des données biométriques. En particulier, plutôt que de créer de grandes bases de données biométriques qui pourraient conduire à des brèches de vie privée importantes en cas de fuite, les solutions où la donnée est stockée directement dans un matériel de confiance sous le contrôle de l'utilisateur devraient être privilégiées (par exemple du type *Match On Card*).

Grandes tendances et enjeux

Protection des infrastructures critiques dans la ville numérique.

Plusieurs enjeux sont à prendre en compte dans la réflexion :

- **Mettre l'utilisateur au centre des dispositifs de sécurité**

Cette condition est fondamentale pour l'acceptation des nouvelles architectures : elle pose en particulier la levée d'un certain nombre d'enjeux, parmi lesquels, la prise en compte de la « sécurité individuelle » par rapport à la « sécurité collective », la prise en compte des contraintes légales, éthiques, d'acceptabilité pour la protection des biens, des personnes, la définition et mise en œuvre des critères d'« utilisabilité » pour soutenir une transformation de la gouvernance, la prise en compte de l'évolution des comportements des utilisateurs

- **Intégration des technologies liées à la sécurité**

Il s'agit en particulier d'aller vers des ERP de sécurité complets, assurant convergence de la sécurité dite « Physique » et « Logique » et virtualisation de l'ensemble des composants de l'architecture, y compris capteurs et opérateurs (ou leurs avatars).

- **Mettre en place une approche « globale » de la sécurité**

L'enjeu principal est de mettre en place de nouvelles méthodes de gouvernance et de conception dictées par l'anticipation plutôt que la réaction sur règles, impliquant une conception où la sécurité et protection de la vie privée sont pris en compte par construction, mais aussi une distribution des fonctions de sécurité entre nœuds du réseau basée sur des mécanismes coopératifs avec fonctions d'apprentissage.

- **Renforcer l'ingénierie de « systèmes de systèmes » et en particulier autour de la résilience**

La recherche de méthodes formelles pour la résilience des systèmes à logiciels prépondérants est un enjeu majeur de la prochaine décennie. Il s'agit de faire émerger des approches scientifiques mettant en œuvre des méthodes formelles et permettant de garantir sur ces logiciels le nombre grandissant de leurs propriétés de sécurité critiques. Ces approches devront pouvoir être mises en place de façon compositionnelle et passer à l'échelle sur des codes dont le volume est en constante augmentation. Le niveau de garantie offert par ces approches, en particulier sur des systèmes hybrides mélangeant logiciel, électronique et composants physiques, sera un point de recherche important.

Cyber-sécurité et stratégies associées

Il s'agit principalement d'asseoir les fondements techniques et scientifiques de la cyber-sécurité, en mettant en œuvre une approche multidisciplinaire systématique, rigoureuse permettant de bâtir un cadre permettant de découvrir des lois théoriques ou expérimentales, de mettre en place des bancs de tests expérimentaux, de proposer des architectures génériques, de mettre en place des méthodes standardisés de collecte d'information, de simulation d'environnements SSI, de techniques de test de comportements de type attaquants/attaqués, de mettre en place des métriques communes.

Sécurité du Cloud

N'étant applicables que sur des systèmes plutôt stables, statiques et fermés, les solutions techniques existantes ne sont plus du tout adaptées à ces nouvelles applications. Les flux dans l'Internet changeront de ou vers les Clouds, changeant aussi les besoins et les propriétés de sécurité de l'Internet en tant qu'infrastructure. Les vérifications de certaines propriétés pourront être assistées par les opérateurs des Clouds, notamment dans le BGP (Border Gateway Protocol), dans le DNS (SEC) ou pour sécuriser le mail. Dans ce contexte, les verrous technologiques et/ou scientifiques seront liés à la confiance pour l'accès et les échanges de contenus, pour l'utilisation et la composition de services mais aussi dans le cadre d'échanges d'informations sensibles, les fonctions d'audit et de contrôle, les outils de formalisation et de suivi d'engagement de niveau de service (« automated SLA »).

Sécurité des données externalisées

La sécurité est incontestablement l'un des enjeux principaux pour l'acceptation de toute solution visant l'externalisation des données ou de services sensibles. Le grand public a également besoin que ses données personnelles soient protégées, et ce quel que soit le contexte d'application (transactions, M2M). En ce sens, des solutions innovantes combinant des fonctions de chiffrement adaptées (tels que le chiffrement homomorphe ou la recherche sur données chiffrées), des langages pour exprimer ses propres politiques, des techniques d'anonymisation, des interfaces ergonomiques de paramétrage doivent être définies pour garantir la prise en compte (la plus automatisée possible) de la confidentialité et du respect de la vie privée dans le traitement de l'information dans ces systèmes qui seront prochainement déployés. Les questions de chiffrement, de cryptographie et de cryptanalyse soulèvent en retour des questions relevant des mathématiques dites pures (arithmétique, courbes algébriques). D'autres domaines, comme la santé où l'information est nécessairement

partagée et répartie entre le grand public et les professionnels, sont aussi concernés. Au-delà de la confidentialité, des questions importantes comme la traçabilité et l'intégrité des données sont à traiter. On retrouve ici le besoin pour de nouveaux mécanismes de protection des contenus.

Protection de la vie privée

Du point de vue technique, des technologies respectueuses de la vie privée (ex., accréditations anonymes, retrait privé d'information, chiffrement homomorphe, ...) ont été développées au cours des dernières années afin de permettre à un individu de limiter les traces numériques qu'il génère et aussi de garder la souveraineté sur ses données personnelles. Cependant, il existe encore un effort important à faire pour transporter ces technologies du domaine de l'initié à celui du grand public. Le contexte actuel de la révision de la directive européenne sur la protection des données personnelles met en avant le principe du « *privacy by design* », qui vise à intégrer dès la phase de conception d'un système d'information les problématiques de respect de la vie privée. Bon gré mal gré, l'ensemble des utilisateurs/exploitants vont devoir intégrer cet aspect dans leur expression de besoin et les entreprises vont donc devoir intégrer cet aspect dans le développement de leurs produits, le mieux étant évidemment d'anticiper changement en tant qu'opportunité et non pas de le voir comme une contrainte. On peut donc s'attendre à ce que la protection de la vie privée connaisse un essor important et devienne un enjeu prioritaire aussi bien au niveau national, européen et international. Il est donc nécessaire de répondre à cet enjeu à travers une programmation de recherche appropriée mais aussi en soutenant le développement de services et d'entreprises plaçant les technologies respectueuses de la vie privée au cœur du système. De plus, contrairement à l'idée préconçue que la protection de la vie privée et la sécurité informatique sont deux concepts antagonistes et que pour avoir l'une il faut sacrifier l'autre, ces deux concepts sont en fait complémentaires et doivent être adressés conjointement.

Par ailleurs, protéger la vie privée et en particulier les données à caractère personnel est devenu une tâche de plus en plus difficile par rapport aux lois en vigueur. Ce nouveau défi a incité la Commission européenne à revoir le cadre juridique (directive 95/46/CE) relative à la protection des données personnelles. Ce processus lancé en 2009 a permis la diffusion une nouvelle proposition de régulation européenne en janvier 2012 qui devrait normalement aboutir pour 2014. Ses objectifs sont les suivants:

- moderniser le système juridique de l'UE pour la protection des données personnelles, en particulier pour relever les défis résultant de la mondialisation et de l'utilisation des nouvelles technologies,
- renforcer les droits des individus, et en même temps réduire les formalités administratives pour assurer la libre circulation des données personnelles au sein de l'UE et au-delà,
- améliorer la clarté et la cohérence des règles de l'UE en matière de protection des données personnelles et de réaliser une mise en œuvre et l'application uniforme et efficace du droit fondamental à la protection des données personnelles dans tous les domaines d'activités de l'Union.

Le nouveau cadre se compose désormais d'un règlement (remplaçant la directive 95/46/CE) établissant un cadre général de l'UE pour la protection des données et une directive fixant les règles relatives à la protection des données à caractère personnel traitées dans le cadre de la prévention, de détection, d'enquête ou de poursuites des infractions pénales et des activités judiciaires connexes (utilisé pour la lutte contre le terrorisme). Cette dernière directive

remplace la décision-cadre 2008/977/JAI relative à la protection des données à caractère personnel traitées dans le cadre de la coopération policière et judiciaire en matière pénale.

Cette nouvelle réglementation exigera notamment une labellisation des fonctionnalités de confidentialité et de respect de la vie privée similaire à celle existante en matière de sécurité (Critères Communs). Celle-ci reste à construire selon les futures propositions des Etats Membres de l'U.E. et devra être appliquée aux futurs produits et les solutions. Une anticipation est nécessaire tant son impact sur les développements R & D sera majeur tant en terme de développement que de labellisation mais aussi sur les fonctionnalités de sécurité associées.

Sécurité des systèmes d'identification et d'authentification

Les organisations montrent des besoins à la fois pour des technologies arrivées à maturité, comme la signature unique, et pour des technologies en évolution ou naissantes, comme la gestion de la politique de sécurité basée sur des rôles ou la gestion des droits.

Interopérabilité. Le besoin/enjeu d'intégration de l'IAM avec des technologies connexes telles que la prévention des pertes d'information est réel. Le besoin d'intégration est à prendre au sens large, avec les référentiels d'identités des ressources humaines, voire entre produits concurrents par le biais de certification de l'interopérabilité. Par ailleurs, la virtualisation et le Cloud Computing sont des changements technologiques que l'IAM doit cibler et dans lesquels il doit s'intégrer.

Logiciel-en-tant-que-service. L'IAM fourni en tant que service n'en est qu'à ses prémices. Cette proposition peut séduire des organisations désirant obtenir plus rapidement la mise en œuvre des fonctions d'IAM, alignées sur les besoins des utilisateurs et en les payant sur la base de l'usage qui en est fait. L'IAM-en-tant-que-service peut aussi rendre plus facile la fourniture de rapports de conformité aux réglementations, car ils sont réalisés par le fournisseur lui-même sur la base du contrat établi.

Biométrie. Concernant les systèmes d'identification biométrique, une voie prometteuse est d'utiliser des systèmes crypto-biométriques qui associent clé cryptographique et forme biométrique pour rendre les biométries révocables. Une autre voie pour protéger la vie privée consiste à affaiblir l'association entre l'identité et la donnée biométrique ou l'utilisation d'un support physique complémentaire (technologies dites « match on device »). Mais ces systèmes doivent encore gagner en niveau de sécurité tout en assurant de bonnes performances de reconnaissance et une protection des données privées garantie par construction.

Ruptures technologiques imaginables

Vérification et résilience des systèmes à logiciels prépondérants

L'outillage des processus de vérification de la sécurité des systèmes à logiciels prépondérants est indispensable à l'accélération de leur validation et de leur certification. Ces outils, issus des grands défis scientifiques autour des méthodes formelles, peuvent déclencher l'apparition de composants logiciels *entièrement immunisés* face à un grand nombre de classes de vulnérabilités. La rupture serait alors double : elle créerait une base de confiance sûre pour les systèmes à logiciels prépondérants, et permettrait l'extension de cette base en l'adaptant à des contraintes fonctionnelles et sécuritaires en perpétuelle évolution.

Signaux faibles

L'analyse des signaux faibles dans les systèmes d'information est fondamentale dans la compréhension de la sécurité des systèmes complexes et le développement de la cyber-

sécurité. Il s'agit fondamentalement d'étendre les notions de surveillance de systèmes à la détection de signaux faibles dans les comportements d'utilisateurs, mais aussi dans les comportements de veille dans les réseaux sociaux et informatiques. Une rupture technologique fondamentale serait de passer de la simple reconnaissance d'intrusion à l'identification de chemin suspects ou de parcours de branches mortes dans un réseau ou une infrastructure, permettant de jeter les bases d'une conception dynamique et prédictive des systèmes devant être fonctionnellement sécurisés.

Cryptographie post-quantique.

La presque totalité des systèmes de cryptographie repose actuellement sur l'algorithmique de la factorisation entière et du logarithme discret. Cette algorithmique devient de plus en plus performante, et les systèmes doivent donc utiliser des clés de plus en plus longues pour conserver un chiffrement sûr, au détriment de la performance du déchiffrement. De plus, on sait que ces cryptosystèmes perdent une grande partie de leur sécurité dans le monde des ordinateurs quantiques. Il y a donc urgence à concevoir d'autres cryptosystèmes qui reposent sur d'autres problèmes algorithmiques, et il y a plusieurs candidats : les codes correcteurs d'erreurs, mais surtout la cryptographie « multivariée », ou les réseaux euclidiens. On peut alors suivre plusieurs directions de recherche telles que (i) comprendre mieux les problématiques de complexité, en particulier dans le cadre quantique, (ii) développer l'algorithmique sous-jacente, et (iii) l'adapter aux exigences des protocoles qui demandent des fonctionnalités à la diversité croissante. De plus, la cryptographie quantique contient elle-même le potentiel pour permettre le déploiement d'architecture dont la sécurité serait garantie directement par les lois de la physique plutôt que la supposée difficulté d'un problème mathématique. Il est donc important de continuer à soutenir la recherche sur ce domaine qui pourrait dans le futur avoir un impact important sur la sécurité des systèmes d'information et proposer des alternatives aux architectures actuelles. D'autres pistes consistent à utiliser des structures mathématiques complexes (courbes algébriques) pour les questions de cryptographie et de cryptanalyse.

Big-Data, « Advanced analytics » et protection de la vie privée

Un autre des grands défis numériques des prochaines années dont la résolution constituerait une véritable rupture technologique va être la conciliation des possibilités offertes par l'analyse et la fouille de grandes masses de données (par exemple en sociologie, épidémiologie mais aussi en sécurité) avec le respect de la vie privée des individus. En effet, l'accroissement et l'interconnexion des données disponibles permet de mieux comprendre notre société mais entraîne aussi des risques de dérives importantes pouvant affecter le quotidien des personnes. En particulier, il est possible que dans un futur proche les informations collectées sur un individu conduisent à une forme de discrimination généralisée, que ce soit au niveau de la personnalisation des services en ligne mais aussi pour la détermination du prix de sa complémentaire santé ou encore son assurance de voiture (en se fondant sur les requêtes liées à santé effectuées par cet individu sous un moteur de recherche ou encore ses traces de mobilité collectées par une application sous appareil mobile). Une réflexion scientifique et éthique de fond doit donc être menée pour déterminer la frontière entre personnalisation (positive) et discrimination (négative) qui pourrait conduire à nier à un individu le droit d'accéder à une certaine fonction ou encore un bénéfice social simplement en fonction de son profil numérique.

Réseaux orientés contenu (« named data networks »)

La quasi-totalité des réseaux fonctionne selon le modèle orienté connexion : une machine A échange avec une machine B. Ce modèle trouve ses limites lorsque des millions d'entités

consultent une même donnée (engorgement, retransmissions). Le modèle orienté contenu est plus récent. Il permet de requérir des données indépendamment de la machine qui les porte. Ce modèle passe à l'échelle via des politiques de stockage-retransmission des données par des nœuds intermédiaires. Ce modèle pose toutefois de graves problèmes de sécurité et de respect de la vie privée.

Quelques piles protocolaires orientées contenu existent et permettent déjà des utilisations de niche : réseaux ad-hoc, réseau de véhicules, etc. Pour autant, le concept prendra tout son sens à grande échelle. Une rupture pourrait alors se produire, nécessitant une intensification des recherches spécifiques en sécurité (« searchable encryption », « attribute based encryption », détection des égoïstes, etc.).

3.3 Domaines clefs de recherches scientifiques et technologiques

Grands défis technologiques et scientifiques à 5 ou 10 ans

Protection des infrastructures critiques.

Les enjeux de recherche de ce thème concernent les axes suivants

- La sécurité des infrastructures critiques est abordée de manière générique et globale – la protection de la vie privée est au centre de la démarche.
- Les composants de sécurité sont « virtualisés » et deviennent les éléments exogènes d'un « ERP » de sécurité physique.
- Les systèmes d'hypervision de sécurité sont délocalisés, distribués et restent accessibles en tout lieu à tout instant.
- L'interprétation des signaux faibles devient partie intégrante de l'approche de la sécurité physique
- Les systèmes de sécurité s'adaptent à des situations non prévues à la conception.

Un axe de recherche mérite par ailleurs une attention particulière :

Détection d'intrusion

Les systèmes de détection d'intrusions ou plus généralement tous les composants logiciels qui participent à la surveillance des systèmes d'information et à la supervision de la sécurité devront faire face à de nouveaux enjeux : mobilité croissante, prolifération des interconnexions entre systèmes les plus hétérogènes, explosion des flux de données, quantité colossale d'informations à agréger et à analyser. Par ailleurs, on sait maintenant que dans ce domaine la complète automatisation est illusoire : l'expertise technique humaine est inévitable, et dans le futur de nouveaux outils d'aide à l'analyse devront nécessairement voir le jour. Ces derniers s'appuieront sur des heuristiques avancées, de la fouille de données (data mining, statistiques avancées) sur fond de « big data », ainsi que sur des capacités en cartographie et en visualisation et représentation intelligible. Une tendance importante est le rapprochement des techniques de détection d'intrusion et des techniques de suivi de flux d'information et de suivi de teinte (tainting). Ce rapprochement tente d'apporter une réponse à l'explosion des volumes.

Cyber-sécurité et stratégies associées

Il s'agit d'assurer la protection des grandes infrastructures transactionnelles civiles contre la fraude et la malveillance, et en particulier de pouvoir développer les algorithmes, outils ou méthodes permettant en particulier de garantir, au niveau de ces infrastructures :

- La détection des attaques, la mise en place de modes résilients, auto-réparables,

- La localisation, la confidentialité et l'intégrité des données de bout en bout (en particulier dans le passage en mode Cloud des applications),
- La protection contre les fausses valeurs (fraudes à l'identité, et autres attaques),
- La sécurisation des dispositifs embarqués sur mobiles (approches ByOD),
- La gestion de l'hétérogénéité et de l'interopérabilité sécuritaire intra et inter-réseaux.

Un axe de recherche important consistera en particulier dans la mise en œuvre de démarches multi-domaines (e.g. « serious games », « big-data et advanced analytics », intégration SHS-sciences du comportement, économie, réglementation...)

Par ailleurs, l'augmentation de la complexité des systèmes d'information et la multiplicité des nouvelles technologies (smart phones, tablettes ou plus généralement n'importe quel équipement électronique embarquant un micro-logiciel présentant une certaine surface d'exposition aux attaques informatiques) est galopante. L'expertise dans la connaissance des armes informatiques (virus, codes malveillants, logiciels espions, rootkits, etc.) va devenir plus importante que jamais, notamment en termes de capacités d'analyse et de rétro-ingénierie.

Sécurité du Cloud

Les briques de base de la cryptographie se complexifient fortement. On ne se limite plus à des protocoles de base comme le chiffrement, la signature, l'identification, où l'on veut que certains déchiffrent, et d'autres non. On veut maintenant pouvoir déchiffrer « dans certaines conditions », seulement « une partie » du message, uniquement pour « certains » utilisateurs. Cette cryptographie dite fonctionnelle intervient de manière centrale pour sécuriser beaucoup d'applications sociétales, comme la monnaie électronique, le vote électronique, les enchères électroniques, la sécurisation des données médicales. Elle est centrale dans la cryptographie du nuage, qui regroupe les données de multiples utilisateurs et permet des calculs partagés sur ces données. Les principales opérations à sécuriser sont alors le dépôt de fichiers sur des serveurs distants, le partage de données, avec le contrôle de leur accès, éventuellement anonyme. Il faut inventer la cryptographie adéquate, qui doit être « distribuée » et confiée aux utilisateurs. Elle est fondée sur d'autres briques de base, comme le chiffrement homomorphe, qui permet de calculer directement sur les chiffrés, sans les avoir préalablement déchiffrés. Il faut mieux comprendre ces briques de base, développer leurs fonctionnalités et leur efficacité

Sécurité des contenus culturels

Il s'agit de permettre une consommation raisonnée des contenus culturels numériques. Les défis sont nombreux et les recherches dans ce domaine concernent les usages, les modèles de menace et plusieurs domaines techniques. Sur le plan technique on peut citer les nouveaux paradigmes de distribution comme les « named data network » qui posent de difficiles problèmes de sécurité et de respect de la vie privée. Des recherches seront également nécessaires dans des domaines plus traditionnels, en particulier : le marquage de contenus (watermarking), la prise d'empreinte de contenus (fingerprinting), et l'obscurcissement de code (obfuscation, white box cryptography).

Sécurité des données externalisées

Les principaux défis technologiques ou scientifiques concernent les domaines suivants

- Savoir gérer l'identité et protéger les données privées; proposer des approches pour le droit à l'oubli

- Savoir gérer la multiplication des identités émises de plus en plus par des acteurs privés et souvent extra-territoriaux
- Aller vers des systèmes de gestion des identités et d'accès privées faciles d'emploi, ubiquitaires (e.g. virtualisation sur terminaux mobiles d'identités régaliennes) et de nouveaux mécanismes d'instauration de la confiance (SSO, Tiers de Confiance, Systèmes de « e-reputation »,...)
- Interfaces FAI : aller vers des « front-end » transparents (contrôle utilisateur des données fournies, facilité de mise en œuvre de mécanismes « d'opt-in, opt-out »), frugaux (principes de divulgation minimale), fluides et résilients
- Proposer des approches de la confiance pour la protection des mineurs et personnes fragiles

Protection de la vie privée

Des solutions innovantes combinant des fonctions de chiffrement adaptées (tels que le chiffrement homomorphique ou le chiffrement cherchable), des langages pour exprimer des propres ad-hoc, des techniques d'anonymisation, des interfaces ergonomiques de paramétrage doivent être définies pour garantir la prise en compte (la plus automatisée possible) de la confidentialité et du respect de la vie privée dans le traitement de l'information dans ces systèmes qui seront prochainement déployés. D'autres domaines, comme la santé où l'information est nécessairement partagée et répartie entre le grand public et les professionnels, sont aussi concernés. Au-delà de la confidentialité, des questions importantes comme la traçabilité ou l'intégrité des données sont à traiter. On retrouve ici le besoin pour de nouveaux mécanismes de protection des contenus. Le développement croissant des services de messagerie instantanée conduit à une production de masse de données interprétable de plus en plus importante. La conception de tels services respectueux de la vie privée est un des grands défis technologiques des prochaines années, celui-ci étant rendu encore plus prégnant par le taux de pénétration des appareils mobiles.

Le développement croissant des services géo-localisés, qui fournissent un service personnalisé par rapport à la position d'un individu, conduit à une production de masse de données de mobilité de plus en plus importante. La conception de services géo-localisés respectueux de la vie privée est un des grands défis technologiques des prochaines années, celui-ci étant rendu encore plus prégnant par le taux de pénétration des appareils mobiles. Les smartphones étant devenus la cible privilégiée de malwares, il est important d'investir en parallèle dans le développement des moyens de protection adaptés à ces appareils. Ce domaine d'investigation est d'autant plus critique que les appareils mobiles vont être au cœur de la gestion de l'identité numérique d'un individu (ex : abonnement de transport dématérialisé, carte de fidélité virtuelle ou encore paiement sans contact).

Le droit à l'oubli peut se définir comme le droit dont disposerait tout individu de supprimer les traces numériques de ses actions. Bien que mis en avant dans le futur règlement européen sur la protection de données personnelles, la mise en œuvre technique de ce droit va être un des grands défis en termes de recherche dans le domaine de la protection de la vie privée. En dehors du droit à l'oubli, d'autres concepts font aussi leur apparition dans le projet de nouvelle réglementation européenne sur la protection des données personnelles telles que le droit à la portabilité des données, qui permettrait à un internaute de quitter un fournisseur de service avec ses données personnelles en format standardisé pour migrer vers un autre fournisseur. Ainsi, on peut imaginer qu'un utilisateur quitte un réseau social tel que Facebook s'il n'est pas d'accord avec la manière d'opérer de cette entité pour aller s'inscrire chez un concurrent, le tout en partant avec ses données. Ces nouveaux droits doivent être

accompagnés de moyens techniques pour les implémenter qui n'existent pas encore à l'heure actuelle et qu'il convient donc de développer.

Par ailleurs, protéger la grande quantité de données à caractère personnel est devenu une tâche de plus en plus difficile par rapport aux lois en vigueur. Ce nouveau défi a incité la Commission européenne à revoir le cadre juridique (directive 95/46/CE) relatif à la protection des données personnelles. Ce processus lancé en 2009 a permis la diffusion d'une nouvelle proposition de réglementation européenne en janvier 2012 ⁽¹⁾. Les objectifs en sont les suivants:

- moderniser le système juridique de l'UE pour la protection des données personnelles, en particulier pour relever les défis résultant de la mondialisation et de l'utilisation des nouvelles technologies,
- renforcer les droits des individus, et en même temps réduire les formalités administratives pour assurer la libre circulation des données personnelles au sein de l'UE et au-delà,
- améliorer la clarté et la cohérence des règles de l'UE en matière de protection des données personnelles et de réaliser une mise en œuvre et l'application uniforme et efficace du droit fondamental

Sécurité des systèmes d'identification

Les principaux domaines techniques à envisager concernent:

Authentification. Il existe une demande croissante de moyens d'authentification plus forts que les mots de passe, qui soient en même temps plus faciles d'emploi et d'un coût abordable. Les technologies à investiguer incluent par exemple biométrie multimodale ou sans contact, les fonctions physiquement non-clonables (« Provable Unclonable Functions »), signatures matérielles (ex. Empreinte technologique d'un smartphone et de ses capteurs embarqués). Ces fonctions d'authentification deviennent non seulement nécessaires pour les utilisateurs physiques mais aussi pour l'ensemble des objets du réseau. En complément, de nouveaux algorithmes d'authentification basés sur l'anonymité (et la preuve de possession de secrets) ou la pseudonymité constituent une nécessité pour les approches « privacy by design ».

Signature unique. La signature permet aux utilisateurs du système d'information préalablement authentifiés d'accéder aux applications protégées sans entrer de mot de passe supplémentaire, et sans modifier les applications pour cela. La mise en place de nouveaux mécanismes et algorithmes ubiquitaires agnostiques par rapport aux terminaux et aux protocoles d'accès (en particulier dans le Cloud) constitue un champ d'investigation particulièrement important (systèmes PKI 3.0, « non-PKI »,...)

Gestion du cycle de vie des rôles. Il s'agit ici de mettre en œuvre des alternatives aux classiques systèmes de type LDAP, et de formaliser les rôles des utilisateurs de systèmes SII. Ces rôles contiennent les droits d'accès au système d'informations, et sont affectés via des règles aux utilisateurs. L'interdépendance croissante entre le monde virtuel et le monde réel doit conduire au développement de solutions universelles et pertinentes pour ces deux mondes. La gestion du cycle de vie des rôles est chargée d'aider à identifier les rôles, de les mettre en adéquation avec les métiers de l'entreprise, de les assigner aux utilisateurs et de faire des rapports à des fins de gouvernance, conformité aux réglementations, gestion des risques et plus globalement d'intelligence de la sécurité. Dans ce domaine, la définition d'ontologies et d'algorithmes de traitement appropriés prouvables du point de vue la sécurité est cruciale, notamment dans les architecture de type Cloud ou Internet des Objets.

Gestion des droits. De nouveaux concepts, algorithmes et méthodes sont à proposer pour la définition des autorisations, gestions des privilèges ou des permissions, détermination et application des règles d'accès grain fin aux ressources du système d'information dans les architectures du futur, ainsi que pour la gestion de la sécurité des infrastructures physiques.. La finalité globale doit être de faciliter la mise en œuvre la politique de sécurité des accès aux données, aux applications, aux services, aux serveurs, en particulier dans les futurs ERP de sécurité, les architectures Cloud ou encore l'Internet des Objets.

Provisionnement des utilisateurs ou des objets distants. Sur la base de la politique de sécurité des accès, le provisionnement crée les comptes des utilisateurs/objets dans le système d'information. Il propage également les modifications des profils des utilisateurs depuis les référentiels, fournit éventuellement les mots de passe initiaux pour la signature unique, le bootstrapping éventuel des fonctions de sécurité et réconcilie la politique implémentée dans le système d'information avec la politique de sécurité souhaitée.

Contrôle d'accès web. Il fournit l'authentification et la signature unique aux utilisateurs externes accédant aux applications web de l'entreprise, en fonction de la politique de sécurité et sans être intrusif dans ces applications. Via un portail destiné aux employés, il permet également notamment la réinitialisation des données d'identification, la délégation de l'administration

Fédération des identités. Elle permet de transférer une preuve d'authentification des utilisateurs entre des domaines indépendants entre lesquels est préalablement installée une relation de confiance. Elle est principalement utilisée en complément du contrôle d'accès web.

Composants et circuits. Les circuits intégrés sont les éléments clefs de la sécurité des systèmes de traitement de l'information et de communication ; on les retrouve comme cœur des systèmes de chiffrement, support de l'authentification forte (cartes à puce, cartes SIM), racine des architectures de confiance (« Trusted Computing », « TPM pour Trusted Platform Module »). Le domaine des composants sécurisés est un domaine dual pour la Défense et le civil, la différence principale résidant dans les algorithmes utilisés.

Toutefois, bien que nettement plus résistant aux attaques que beaucoup de logiciels, ils restent vulnérables face aux attaquants ayant un accès physique (cryptanalyse matérielle, analyse physique, attaques par canaux auxiliaires, injection de fautes). De plus, ces composants implantent souvent des algorithmes standardisés, rendant possible le clonage une fois les secrets révélés.

La problématique du contrôle de la chaîne d'approvisionnement (« Supply Chain ») est critique, laissant envisager des attaques de type chevaux de Troie ou vers (« hardware Trojan »), ou l'utilisation de contrefaçons moins résistantes et sûres que les originaux.

Enfin, la généralisation du besoin de sécurisation à tout système de traitement de l'information (SCADA, smartgrids, smartmetering, mobilité, etc) se traduira probablement par la généralisation de l'utilisation de fonctions cryptographiques dans tous les composants d'un système (capteurs, actionneurs, etc) accentuant le caractère stratégique de la maîtrise de la conception et de la production des composants sécurisés.

Il est essentiel de maintenir une recherche sur les attaques de haut-niveau dans un environnement responsable et contrôlé afin d'éviter une utilisation malveillante des résultats et surtout une perte de confiance des utilisateurs. Une collaboration étroite entre les laboratoires étatiques (ANSSI, MINDEF, DGA), les CESTIs, les laboratoires académiques et les industriels est nécessaire afin de rassembler une masse critique sur un secteur très morcelé.

La DGA et l'ANSSI (par exemple sous la forme de financement de doctorat), en liaison avec l'ANR, sur un plan national, et la Commission Européenne ont un rôle majeur à jouer de soutien et d'incitation. De même, il s'agira de développer recherche et développement pour garantir l'intégrité des composants même en cas de non maîtrise de la chaîne de production.

Cadrage par quelques données marché

Les infrastructures critiques urbaines, industrielles et institutionnelles

- Le marché mondial des **équipements** de sécurité représente environ 20 milliards de dollars en 2012 dont près de 40% sur les systèmes de vidéosurveillance. Les marchés aux Etats Unis et en Europe pèsent environ 25% chacun, 11% en Chine, 20% dans le reste de l'Asie, et 8% au Moyen Orient. Le marché français (incluant les équipements de sécurité) se situait à environ 1,2 milliard d'euros en 2012.
- On estime à environ 1,8 milliards de dollars le marché 2012 des prestations de service à forte valeur ajoutée complémentaire à ce marché. (*Source Frost & Sullivan*), dont 200 M€ en France
- La **croissance** de ce marché est estimée aujourd'hui à environ 3,7% aux Etats Unis, 2,8 % en Europe (hors Europe de l'Est) et 12% au Moyen Orient (avec de fortes fluctuations dues aux désengagements américains), et environ 8% en Asie.
- **Le chiffre d'affaire engendré par les technologies biométriques devrait s'élever à 8,5 milliards d'euros en 2015**, contre 4,2 milliards d'euros en 2012 selon l'agence Market&market⁴ soit +100% en 3 ans.
- Connaissant un développement spectaculaire depuis les 5 dernières années, le segment des infrastructures urbaines (« Smart-City ») pourrait connaître un développement spectaculaire et (toujours selon Market&market) atteindre le chiffre astronomique de 1,1 Trillion\$ en 2016 (dont probablement 5 à 6 % pour les dispositifs et services de sécurité associés, soit autour de 50 milliard de dollars). Les aspects M2M et sécurisation d'infrastructures de type IoT (« Internet of Things ») sont au cœur du sujet.

Systèmes d'Identification et de confiance numérique

- Le marché de la gestion de l'identité et de l'authentification a représenté (IDC) 4,2 Md\$ en 2011 avec un CAGR attendu de l'ordre de 12 à 15% jusqu'à l'horizon 2016.
- Le marché de la carte à puce a représenté plus de 7,4 milliards unités en 2012 (source : Eurosmart) pour un revenu mondial de l'ordre de 7,5 milliard d'euros avec des prévisions de croissance attendues de l'ordre de 10% sur les 5 prochaines années, tiré par le développement du marché de la téléphonie mobile (LTE-4G et services sans contact), le marché des services financiers (déploiements EMV, e-banking, m-banking), le marché de la sécurité internet et des réseaux, le développement des dispositifs d'e-identité (cartes d'identité, passeports, permis de conduire,...)

Cyber-sécurité et protection des grandes infrastructures transactionnelles

Concernant la cyber-sécurité, une donnée importante de cadrage peut être représentée par l'investissement US sur le secteur en 2013 : plus de 610M\$ (dans le cadre d'un programme pluriannuel sous contrôle direct de la Présidence).

La sécurisation des grandes infrastructures transactionnelles représente un enjeu économique considérable, comme peuvent l'indiquer quelques figures marché :

- Le marché des services publics de Cloud a représenté un CA mondial de l'ordre de 75 Md\$ (Gartner) en 2011, avec une progression attendue de l'ordre de 25% par an sur la période 2012-2016 et 8-10% environ de ce montant consacré à la sécurisation.
- Le marché des services mobiles a dépassé le seuil du trillion \$ en 2012 avec une progression attendue de l'ordre de 4,5% par an sur la période 2013-2017.

3.4 Analyse des forces et faiblesses

La France bénéficie à ce jour d'une solide base de compétences en sécurité numérique, reconnue internationalement, dans le tissu des organismes de recherche et d'enseignement (CNRS, CEA, Inria, universités, grandes écoles...), fruit d'une excellente recherche fondamentale et de soutien au niveau des politiques de recherche depuis les années 2000.

Des thématiques de recherche sont fortement couvertes (c'est-à-dire qui apparaissent dans les domaines de compétence de plusieurs équipes) par les équipes actuelles (voir 'Forces' tableau ci-dessous).

Des thématiques de recherche devraient être plus explorées en France, incluant en particulier les thèmes portés ci-dessous en 'Faiblesses' du domaine académique.

Ces compétences en recherche irriguent en particulier les départements d'enseignement et plusieurs masters en sécurité numérique existent dans les universités et grandes écoles. Il faut constater que les besoins actuels et estimés pour les prochaines années des entreprises et organismes opérants en France ne sont actuellement pas couverts et que l'on assiste à un déficit fort de compétences de haut niveau en sécurité numérique. Il faut aussi noter le manque global de sensibilisation à la sécurité numérique dans les grandes écoles ainsi que dans les filières non spécialisées en sécurité.

Face à l'augmentation constante et à la sophistication croissante des attaques informatiques en particulier, l'État n'a pas les moyens de défendre seul le périmètre complet des infrastructures et industries critiques, ni de promouvoir des solutions de confiance numérique (malgré des tentatives comme IdéNum). De même les entreprises se sentent souvent désarmées vis-à-vis de la mise en œuvre de politiques SSI et de menaces cyber en perpétuelle évolution ce qui peut porter atteinte à leur activité opérationnelle (performance opérationnelle, vol de patrimoine scientifique et technique national, déni de service, ...).

Concernant les aspects civils, le marché français de la (cyber) sécurité n'est pas encore structuré, la base industrielle spécialisée non consolidée, en l'absence d'une vision claire des domaines de souveraineté et d'une politique industrielle ou de filière accompagnée des investissements nécessaires en R&D.

Cette situation empêche la France de promouvoir ses savoir-faire face à la concurrence internationale, souvent fortement soutenue par son gouvernement d'origine.

Un besoin de structuration de R&D dans ce domaine, (Académiques, PME et ETI, Grands Groupes, Institutionnels) se fait donc sentir compte tenu des enjeux nationaux que cela représente.

On distingue dans les analyses qui suivent les domaines académique et industriel, non pas pour les opposer mais pour mieux souligner leurs spécificités et complémentarités.

Domaine académique

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none">• Ecole mathématique Française• Informatique théorique et	<ul style="list-style-type: none">• Nombre de brevets déposés• Budget consacré à la sécurité au plan national• Manque de coordination globale inter-équipes

<p>modélisation formelle</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bonne pratique de la coopération industrielle en mode P2P • Points forts : autorisation et contrôle d'accès, sécurité des systèmes distribués, sécurité des réseaux sans fils, cryptologie, cryptanalyse, politiques de sécurité, détection d'intrusion, protection de la vie privée, sécurité prouvable et certification, vérification formelle de preuves de sécurité, sécurité matérielle et physique, analyse de canaux cachés, ingénierie de la sécurité, gestion des risques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Masse critique insuffisante dans quelques domaines sensibles : sécurité et mobilité, sécurité des données, protection de la vie privée, sécurité matérielle, conception conjointe matériel/logiciel pour la sécurité, sécurité prouvable et certification, sécurité des systèmes distribués (IoT, cloud), sécurité des infrastructures critiques, configuration sûre, monitoring de grands réseaux, self-protection et self-healing, sécurité des systèmes d'exploitation, apprentissage supervisé ou non pour la SSI, géostratégie de la sécurité numérique, sécurité des systèmes industriels de type Scada, « compositionnalité » des fonctions de sécurité, sécurité des systèmes de systèmes. • Implication dans les Pôles TIC • Manque de Road-map nationale • Formation : déficit de compétences de haut niveau en sécurité numérique ; manque de sensibilisation à la sécurité numérique dans les filières non spécialisées en sécurité
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valorisation des travaux de recherche dans les domaines émergents • Mise en œuvre de plates-formes technologiques (e.g. vie privée, cyber-sécurité) 	<p>Menaces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Notoriété par rapport à des leaders Européens (FhG) • Manque de connexion avec les FAI, les opérateurs mobiles et les PME • Formations sur la sécurité

Domaine industriel

<p>Forces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leadership mondial sur quelques domaines particulier (biométrie, cartes à puces, IAM) • Entreprises de niveau Tier 1 sur les infrastructures critiques • Communauté importante du Logiciel Libre • Tissu important de PME spécialisées en Méthodes formelles appliquées au domaine • Stratégie nationale sur le cloud • Direction stratégique SGDSN, ANSSI, DGA • Pôles de Compétitivité • Haut niveau de compétences des CESTIs 	<p>Faiblesses</p> <ul style="list-style-type: none"> • Absence de FAI de taille mondiale • Pas d'acteur de taille mondiale dans le domaine de la mobilité • Non structuration de l'écosystème national de la sécurité • Taille des opérateurs mobiles français et européens • Stratégie nationale non affirmée • Connaissance et appropriation par les PME • Insuffisance en volume du cloud français
<p>Opportunités</p>	<p>Menaces</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Création d'une filière nationale en sécurité • Directives européennes (privacy by design) • Ecosystème national du cloud et souveraineté • Programme investissements d'avenir • Coopérations européennes • Internet des objets et M2M 	<ul style="list-style-type: none"> • GAFAs (Google, Apple, Facebook, Amazon) • Poids de l'écosystème national pour influencer les standards sauf sur quelques niches (cartes à puce,...) • Faiblesse globale du marketing sécuritaire national • Coût dissuasif des solutions
--	---

3.5 Propositions de mise en place optimale

Outils clefs (Organismes de recherche, Universités, ANR, Pôles, IRT, Idex, H2020..)

Le développement indispensable des activités de recherche et d'enseignement en sécurité numérique doit être basé sur des affichages forts de la thématique en tant que telle et une coordination par l'alliance Allistene en lien avec les pôles des moyens humains, financiers et matériels mis en œuvre.

- Projets ciblés des organismes de recherche sur la sécurité numérique
- Mise en place et montée en puissance de filières de formation aux différents aspects de la sécurité numérique dans les universités et *toutes* les grandes écoles.
- Appels d'offres ANR dédiés au thème de la sécurité numérique sur les domaines de la SNR
- Appels d'offres ANR Franco/XXX sur les thématiques de la SNR
- Projets plates-formes Inter-Pôles TIC sur le domaine
- Appuis sur les IRT TIC (SystemX)
- Implication forte dans les projets européens H2020

Mise en place de plates-formes académiques et/ou industrielles

La mise en place d'une stratégie nationale ou internationale de Recherche en sécurité doit également passer par la mise en place de structures mutualisées de type « plates-formes d'innovation ». Ces plates-formes à double vocation de présenter des catalyseurs de nouvelles initiatives de recherche ou de proposer de référentiels scientifiques ou technologiques de référence pourront s'appuyer sur la mise en commun d'outils et des méthodes liées. La gestion de la vie-privée ou la Cyber-sécurité paraissent des thèmes de manœuvre prioritaires. La création d'une plateforme ouverte d'analyse de cyber-sécurité par exemple permettrait la mutualisation de ressources, la diffusion d'un ensemble d'outils utilisables à des fins de validation et de certification, et la création d'une communauté d'utilisateurs investis dans les problématiques d'assurance de sécurité logicielle.

Partenariats Européens

Le thème de la sécurité est identifié comme l'un des axes prioritaires transverses du programme Horizon 2020, comme des principaux clusters Eureka ou de la JU ECSEL devant résulter de la fusion des JTI ENIAC et Artemis avec la plateforme technologique Européenne EPOSS. En ce sens les enjeux et défis adressés dans ce document, sont compatibles avec le programme Horizon 2020 et (en principe) ceux de la future JU ECSEL. L'articulation entre la SNR et le SRA du programme H2020 (et sans doute celui de la future JU) n'en seront que

facilités (les pôles de Compétitivité de pouvant servir de relai pour la recherche de partenariat en plus des relations existantes au niveau des laboratoires).

3.6 Sécurité numérique et prise en compte du défi du renouveau industriel

La France est la 5^e puissance économique mondiale en 2013, avec un PIB représentant environ 4% du PIB Mondial. Selon un rapport récent de Mc Kinsey ⁽²⁾, l'Internet des Objets devrait représenter l'une des principales technologies disruptive de l'économie mondiale à l'horizon 2025, pour un impact économique global de l'ordre de 2,7 à 6 Trillions de \$ à l'horizon 2025. Dans le schéma de Mc Kinsey, les aspects sécurités de l'Internet des Objets devraient représenter un impact de l'ordre de 100 à 200 Md \$ de ce total soit de l'ordre de 4 à 8 Md \$ en France (4% du total, en cas de politique industrielle fortement stimulée). Le potentiel d'emploi soutenu (sur la base des ratios classiques de la profession : 1h*an ~150 K€ de chiffres d'affaires) serait ainsi de l'ordre de 25 000 à 50 000 emplois.

L'impact économique généré se matérialiserait essentiellement au niveau de

- 1) La réduction de la fraude informatique (valeur estimée en extrapolant les données disponibles en 2012 : 6 000 Md\$)
- 2) La protection des infrastructures critiques (notamment vis-à-vis de la contrefaçon, du travail clandestin,...)

De même l'impact des technologies de Cloud Computing est estimé, toujours selon ce rapport Mc Kinsey entre 1700 Md \$ et 6200 Md\$ à l'Horizon 2025 soit, 68 Md\$ à 250 Md \$ au niveau Français à l'Horizon 2025 (potentiel d'emplois associé : 450 000 à 1 600 000 emplois, dont environ 5% associé à la sécurité soit 25 000 à 80 000 emplois).

Il n'est bien entendu pas question de prendre ces données au pied de la lettre, mais de considérer l'aspect tendanciel et de considérer que le développement d'une industrie nationale autour de la sécurité autour des thèmes de l'Internet des Objets et du Cloud Computing seuls devrait pouvoir représenter un potentiel de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'emplois à l'horizon 2024. A titre de comparaison, la seule industrie de la carte à Puce a créé 14 000 emplois en Europe (directs et indirects, principalement en France et Allemagne) sur la dernière décennie.

De ce point de vue les priorités paraissent être :

- La stimulation d'un écosystème Français du logiciel pour la sécurité du Cloud Computing, dont le tissu national des entreprises du Logiciel Libre pourrait représenter le pivot
- La stimulation d'un écosystème Français de l'industrie de la sécurité de l'Internet des Objets (Modules HW, Logiciels embarqués et d'administration, Services) capable d'adresser une grande partie des défis sociétaux adressés dans Horizon 2020 (e-santé, smart-grids, manufacturing 3.0, protection des infrastructures critiques)

L'écosystème national constitué autour des Pôles de Compétitivité TIC mondiaux et à vocation Mondiale, fédérant l'ensemble des acteurs de la chaîne devrait représenter le principal moteur de cette évolution.

(1) Le nouveau cadre se compose désormais d'un règlement (remplaçant la directive 95/46/CE) établissant un cadre général de l'UE pour la protection des données et une directive fixant les règles relatives à la protection des données à caractère personnel traitées dans le cadre de la prévention, de détection, d'enquête ou de poursuites des infractions pénales et des activités judiciaires connexes (utilisé pour la lutte contre le terrorisme). Cette dernière directive remplace la décision-cadre 2008/977/JAI relative à la protection des données à caractère personnel traitées dans le cadre de la coopération policière et judiciaire en matière pénale. Cette nouvelle réglementation exigera notamment une labellisation des fonctionnalités de confidentialité similaire à celle existante en matière de sécurité (Critères Communs). Celle-ci reste à construire selon les futures propositions des Etats Membres de l'U.E. et devra être appliquée aux futurs produits et les solutions. Une anticipation est nécessaire tant son impact sur les développements R & D sera majeur tant en terme de développement que de labellisation mais aussi sur les fonctionnalités de sécurité associées.

(2) Disruptive Technologies : advances that will transform lives, business and the global economy, May 2013

4. Traitement des données massives, Connaissances, Décision, Calcul Haute Performance, et Simulation Numérique

Dans de nombreux domaines scientifiques et socio-économiques, la volumétrie et la variété des données existantes ainsi que les contraintes de temps de calcul ont fait apparaître de nouveaux défis. Dans les domaines les plus variés des *sciences fondamentales* (physique des hautes énergies, fusion, sciences de la Terre et de l'Univers, bio-informatique, neurosciences) comme dans des secteurs de l'*économie numérique* (business intelligence, web, e-commerce, réseaux sociaux, e-gouvernement, santé, conception des médicaments, télécommunications et media, transports terrestre et aérien, marchés financiers), de l'*environnement* (climat, risques naturels, ressources énergétiques, smart cities, maison connectée), de la *sécurité* (cyber-sécurité, sécurité nationale) ou de l'*industrie* (smart industry, produits sur mesure, chaîne de conception / réalisation des produits intégrée de bout en bout), des méthodes scientifiques et des technologies nouvelles sont nécessaires.

À l'heure actuelle, la science vit une révolution qui conduit à un nouveau paradigme selon lequel "*la science est dans les données*", autrement dit la **connaissance** émerge du traitement des données. De nombreux domaines scientifiques produisent et consomment des volumes de données considérables (la cartographie du génome, l'observatoire virtuel en astronomie, la simulation en physique des particules ou en climatologie). En sciences humaines et sociales, la numérisation du patrimoine (ouvrages précieux, monuments historiques, sites archéologique), la diffusion à grande échelle de contenus culturels (bibliothèques numériques, musées virtuels, musiques, contenus multimédias) et la mise à disposition en ligne de grands corpus d'études (démographie, littérature, histoire...), permettent des analyses jamais égalées dans le passé.

Le traitement de données et la gestion de connaissances représentent ainsi le *quatrième pilier de la science* après la théorie, l'expérimentation et la simulation. L'extraction de connaissances à partir de grands volumes de données (en particulier quand le nombre données est bien plus grand que la taille de l'échantillon), l'apprentissage statistique, l'agrégation de données hétérogènes, la visualisation et la navigation dans de grands espaces de données et de connaissances sont autant d'instruments qui permettent d'observer des phénomènes, de valider des hypothèses, d'élaborer de nouveaux modèles ou de prendre des décisions en situation critique.

Nombreux sont les domaines d'application qui s'appuient sur ce pilier pour élaborer des décisions complexes ou acquérir un niveau d'expertise élevé. On peut citer entre autres : le domaine de la santé (suivi de la propagation d'épidémies, aide au diagnostic, surveillance post traumatique ou post opératoire), le domaine de la gestion de crises (catastrophes naturelles ou nucléaires), le domaine des transports (analyse de flux, assignation dynamique de trafic), le domaine de l'environnement (prévisions météorologiques, contrôle de la pollution) mais aussi le domaine de l'éducation (stratégies de « jeux sérieux », systèmes d'évaluation et de recommandation, interaction sociale dans des réseaux thématiques).

Que l'utilisateur soit médecin, ingénieur, gestionnaire, professeur ou élève, il a désormais recours à des instruments numériques qui augmentent ses capacités cognitives et lui facilitent l'analyse de situations dont la complexité ne cesse d'augmenter. Si on généralise ces instruments au niveau d'entités économiques (entreprises) ou sociales (collectivités, gouvernement), ils deviennent des enjeux de pouvoir (économiques ou politiques) et des enjeux sociétaux majeurs. Les phénomènes « Big Data », « Open Data » et « Linked Data » cristallisent la réflexion autour de ces problématiques et servent de levier au lancement de

plusieurs initiatives tant aux États-Unis qu'en Europe⁵. Internet et le Web jouent aussi un rôle capital, en ce sens qu'ils concentrent une grande part des données et des connaissances et qu'ils concernent des centaines de millions d'utilisateurs.

Les **données massives** (ou Big Data) sont traditionnellement décrites par trois caractéristiques.

- La *Volumétrie* : les volumes auront, selon IDC, dépassé les 4 zetta-octets -10²¹- en 2013. C'est l'axe le mieux maîtrisé aujourd'hui, soit par l'utilisation de fermes de PC en Cloud, soit par des gros serveurs, notamment chez les pionniers du web (Google, Facebook, eBay, Amazon) qui ont développé les infrastructures nécessaires (souvent disponibles en open source) pour passer à l'échelle.
- La *Variété* (données structurées, texte, parole, image, vidéo, données issues des réseaux sociaux, des capteurs de l'internet des objets et des mobiles) est la principale source de la *Valeur*, par croisement de ces données multi-sources, mais sa maîtrise demande encore beaucoup de travaux scientifiques et techniques.
- La *Vélocité* (données arrivant en flux ou devant être traitées en « temps réel) enfin nécessite également des recherches pour optimiser les temps de calcul.

Les données massives offrent de très nombreuses opportunités économiques. La France a raté la première étape (les infrastructures), mais peut encore trouver une forte expansion économique dans la mise en œuvre des applications de valorisation des données. Il faut pour cela mettre en place des actions de recherche pour développer les architectures de 3^{ème} génération. Intégrant infrastructures, algorithmes, appareils mobiles et applications servant des milliards d'utilisateurs, ces applications généreraient, d'après la mission Afdel sur le big data, plus de 40 Mds€ de revenus en 2016 et une création de valeur potentielle de 200 Mds€ dans les administrations publiques européennes.

Le calcul intensif est aujourd'hui un réel enjeu stratégique, et pas simplement pour la production de nouvelles connaissances scientifiques, mais aussi pour la compétitivité économique et la prévention des risques. Il est ainsi devenu un facteur de compétitivité des entreprises pour la conception et l'amélioration de leurs produits (PLM). Le HPC devrait engendrer sur la période 2015 - 2020 des revenus de plus de 200 milliards de dollars selon Terascale, provenant à la fois de la croissance du marché HPC en marche vers l'exascale, mais aussi celui des machines départementales, de plus en plus souvent en lien avec la multiplication des data-centers, avec des applications liées à l'ingénierie, au « Data Analytics » (analyses génomiques ou financières,...) ainsi qu'au déploiement de ressources dans des clouds publics ou privés.

Les enjeux liés à la **modélisation et la simulation numérique** ne sont plus seulement scientifiques, mais ont aussi un impact sociétal considérable. La modélisation et la simulation apparaissent de plus en plus comme des outils d'aide à la décision pour un certain nombre de situations critiques. Les défis d'aujourd'hui concernent la modélisation de systèmes complexes avec l'objectif de traiter mieux et de manière plus précise des systèmes plus grands et de plus en plus complexes (multi-physique, multi-échelle, données réelles souvent bruitées), ce qui induit des besoins toujours croissants. La modélisation et la simulation doivent dorénavant prendre en compte les incertitudes épistémologiques et aléatoires afin de refléter le monde physique et permettre à terme de supporter les décisions.

On ne peut plus aujourd'hui dissocier le calcul parallèle haute performance de l'analyse et de la valorisation des grandes masses de données issues des simulations numériques (climat, combustion, fusion, astrophysique), des grands instruments (LHC, ITER, LSST, LOFAR,

⁵ <http://www.nitrd.gov/Subcommittee/bigdata.aspx>, <http://commonfund.nih.gov/InnovationBrainstorm/>, http://www.aera.net/grantsprogram/res_training/res_grants/rqfly.html.

plateformes génomiques), des grands systèmes d'observation au sol (sismologie et géodésie RESIF) et de l'espace (Euclid, WFIRST, GAIA, imagerie et interférométrie) ou tout simplement des multiples dispositifs d'acquisition de données (séquenceur à haut débit, réseaux de capteurs, réseaux sociaux) qui existent aujourd'hui. La révolution technologique du séquençage conduit, par exemple, aujourd'hui les industriels du secteur (Ion torrent, illumina,..) à se rapprocher des acteurs du calcul intensif industriels (Nvidia) ou académiques (Grand centre de calcul HPC). Dans de nombreux domaines, le volume et la complexité des données défient aujourd'hui nos capacités à les explorer et les analyser. Sans capacité de traitement, d'analyse et de stockage des données, les systèmes ne pourront pas produire de « science » ni d'aide à la décision.

Deux des quatre *cœurs de filière* du Fonds national pour la Société Numérique portent sur les technologies regroupées dans ce Groupe de travail. Renforcer ces technologies, d'une part, et favoriser leur intégration, d'autre part, permettra une augmentation massive de la compétitivité industrielle et économique dans de très nombreux secteurs et l'accélération de l'entrée de la France dans la Société Numérique.

4.1 Tendances de la recherche

Au cœur des sciences de l'information et de la communication, les **données** représentent la matière première consommée par les applications, et la **connaissance** un produit dérivé, utile en soi ou servant de base à la prise de décision. Une question fondamentale réside dans la définition des *processus* faisant émerger cette connaissance. Ces processus mettent en œuvre des chaînes de traitement complexes pour obtenir des produits informationnels à forte valeur ajoutée (règles, comportements, patterns, événements rares...) qui augmentent la compétence des utilisateurs concernés (expert, décideur, élève) ou leur permettent l'élaboration d'une décision rationnelle. Ce qui rend ces processus singuliers, c'est leur capacité à opérer sur des données incomplètes, imprécises ou dynamiques (temporelles), et à exploiter des corrélations probabilistes et des interactions multimodales, imitant en cela l'être humain qui exploite non seulement les artefacts de son environnement mais également les interactions qu'il a avec d'autres êtres humains. La compréhension et l'analyse de ces interactions ont été pendant longtemps un sujet important tant en philosophie qu'en logique, puis sont devenues un sujet d'étude de l'IA (modélisation des interactions entre les agents humains et artificiels), et enfin, aujourd'hui, elles s'imposent comme une démarche stratégique d'acquisition de plus-value et de gain de productivité.

En économie, la théorie de la décision consiste à modéliser la prise de décision chez les agents rationnels (donc avec un comportement en accord avec quelques postulats). **L'aide à la décision** a une couverture plus large que la théorie de la décision en ce sens qu'elle inclut à la fois les contributions théoriques et les pratiques sur les conditions des processus de décision. La théorie de la décision est complètement enracinée dans la pratique de l'aide à la décision. En informatique, l'aide à la décision est abordée sous différents aspects : la modélisation des préférences des décideurs, la modélisation des interactions entre décideurs en vue d'une prise de décision collective (choix social, mécanismes d'enchères ou d'argumentation), la planification qui s'intéresse à l'ordonnancement d'un ensemble de tâches sous conditions. La planification collective est un problème actuel, en particulier lorsqu'elle fait appel à la décision distribuée. En recherche opérationnelle, en revanche, les problèmes de décision sont traités comme des problèmes d'optimisation multicritères. En mathématiques, la théorie des jeux et le développement de nouveaux modèles statistiques sont incontournables ; de nouveaux problèmes se posent mixant probabilités et optimisation, pour la prise de décision pour le management de nouvelles énergies durables mais intermittentes. D'autres sciences impactent l'aide à la décision : la théorie des organisations, la philologie et les

sciences cognitives permettent une nouvelle vision et de nouveaux développements dans le futur.

Les grandes tendances de la recherche en **big data** portent sur des méthodes innovantes de traitement et d'analyse sur toute la chaîne de valeur de la donnée : collecte, indexation, stockage, gestion, exploitation, valorisation, accessibilité, visualisation. Les mécanismes de collecte, d'intégration de données multi-sources, de distribution des données et des calculs (Hadoop, Map/Reduce), dans des environnements Cloud, nécessitent le développement et l'optimisation de nouvelles techniques ou le portage d'algorithmes existants pour le traitement et l'analyse des données. En particulier, les travaux portent sur l'extraction des connaissances, des métadonnées et des ontologies ; les bases de données NoSql ou graphes ; la parallélisation des algorithmes. Le développement d'applications verticales intégrées, accessibles sur tous supports mobiles et commercialisables en mode SaaS sera un des axes principaux de valorisation. Un autre axe visera l'usine digitale, permettant de déployer des applications d'optimisation de la production industrielle. Pour garantir l'acceptabilité des applications par les utilisateurs, de nombreux travaux s'intéressent aux modes d'interaction et aux mécanismes de protection de la vie privée.

Le **HPC** est porté par des travaux visant à une conception et une exploitation efficaces des futures architectures, en rupture par rapport à celles d'aujourd'hui (hardware, système, support d'exécution, bibliothèques numériques), avec la généralisation du parallélisme massif à plusieurs niveaux et de l'hétérogénéité. Les accélérateurs (GPU, co-processeurs) associés aux évolutions des multi-cœurs sont également mis en perspectives, avec plus globalement les problématiques de la consommation énergétique et de la tolérance aux pannes. Par ailleurs, la complémentarité des traitements des masses de données via le HPC et des infrastructures Cloud distribuées concentre de nombreux efforts de recherche.

Les techniques de **simulation numérique** progressent grâce à l'introduction de nouvelles méthodes mathématiques imaginées au plus près des applications, et transférables dans d'autres champs disciplinaires : méthodes multipôles pour l'électromagnétisme, méthodes de décomposition de domaine et de bases réduites en mécanique des fluides, schémas cinétiques (transport, plasmas, gaz raréfiés), méthodes d'ondelettes et multi-grilles pour la compression de données, algorithmes d'échantillonnage pour les problèmes inverses, éléments finis NURBS liés à la CAO, algorithmes stochastiques et statistiques pour la fiabilité et la gestion des incertitudes. Ces techniques sont mises à l'épreuve du passage à l'échelle et de l'adéquation aux nouvelles architectures HPC, par une conception de codes et de bibliothèques de calcul adaptées pour les méthodes numériques et algorithmiques existantes ou à venir. L'exigence de précision est poursuivie par des méthodes directes et inverses, contrôle et calage de modèles, calcul des erreurs et incertitudes. La visualisation des processus de simulation et des données résultantes est un enjeu complémentaire ; il permet de mieux rendre compte des phénomènes analysés et de faciliter l'interprétation des résultats.

4.2 Grandes évolutions attendues (recherche et industrie)

Des évolutions majeures sont attendues dans les domaines scientifiques comme industriels. Cinq défis majeurs doivent être adressés dans le domaine de la **gestion de la connaissance et de la décision** :

- Sur le *plan technologique*, le développement d'infrastructures de calcul haute performance et de stockage massif en nuage permettront un passage à l'échelle d'amplitude significative et un accès au décisionnel à une communauté d'utilisateurs plus large. Il faut également maîtriser l'*hétérogénéité des données* lors de leur intégration et de leur agrégation, en les confrontant à des données de références ou à des ontologies de domaines. La définition notamment de méthodes de raisonnement sur des données

incertaines ou incomplètes constitue un préalable fort à l'intégration sémantique des données.

- Vers une *théorie de la décision qualitative* : Les systèmes décisionnels exploitent ces connaissances et offrent aux experts une palette d'outils qui améliorent non seulement leurs connaissances et leur productivité mais leurs offrent également les méta-connaissances nécessaires à une meilleure interprétation des phénomènes qu'ils observent ou qu'ils surveillent. De façon plus générale, l'aide à la décision doit tenir compte autant des connaissances produites par les processus métiers que des informations qualitatives qui doivent accompagner cette connaissance. L'origine des informations, la confiance en leurs producteurs, leur cohérence, leur complétude, leur exactitude, leur fraîcheur ainsi que la chaîne de transformations qu'elles ont subies sont autant d'éléments indispensables à connaître avant toute prise de décision rationnelle.
- *L'Aide à la Décision pour les systèmes complexes* : le terme *Policy Analytics* est utilisé depuis quelques années pour désigner les activités d'exploration de très grandes masses de données (fouille, extraction de connaissances), pour la construction d'indicateurs synthétiques et de modèles d'aide à la décision utilisés en support de pilotage de systèmes complexes (particulièrement des entreprises ou des organismes publics). Dans le cas de ces systèmes complexes, les problèmes d'évaluation et de décision sont rarement bien structurés. Ainsi, l'enjeu est d'abord situé dans la structuration du problème et la conception d'alternatives. En second lieu, les capacités des entreprises ou des organisations publiques à traiter l'information disponible sont souvent très hétérogènes d'une institution à une autre. Enfin, les processus de décision publique sont souvent soumis à d'importantes exigences de légitimité et de sens. L'aspect méthodologique en décision est donc un problème majeur où la multiplicité des acteurs et l'hétérogénéité sémantiques sont des verrous à lever. Le développement de systèmes d'explication ou de recommandations argumentées est une piste à explorer.
- *L'Aide à la décision dans un environnement ambiant ou ubiquitaire* : les réseaux de capteurs, l'internet des objets, les équipements mobiles produisent quantité d'informations correspondant à des relevés d'observation (météo, trafic, crowdsourcing), des données de surveillance (santé, ville), des événements environnementaux (pollution, tsunami). Ces informations, dites ambiantes, sont pléthore, hétérogènes et parcellaires. Elles doivent être rapprochées avec des référentiels pour les compléter ou en déterminer la sémantique. Elles nécessitent souvent un traitement à la volée pour produire des indicateurs qui serviront à la prise de décision ou au monitoring à distance de tâches ou de contrôle d'équipements. . Le développement de modèles statistiques pour le processus de décision séquentiel dans un flux continu et massif de données est un enjeu. Les applications en industrie ont trait à la sûreté de fonctionnement qui utilise les enregistrements de conditions d'utilisation pour des actions (d'arrêt, de maintenance par exemple) optimisée. Ces travaux doivent tenir compte du contexte de l'utilisateur, de son activité passée, de ses préférences et des interactions qu'il a avec d'autres utilisateurs ou des communautés d'utilisateurs.
- Un autre défi technologique émerge actuellement autour de la *préservation des connaissances pour les générations futures*, posant de façon cruciale la pérennité du stockage et le problème d'interprétation des contenus. Les problèmes soulevés sont à la fois d'ordre technologique (migration d'une technologie à une autre), d'ordre économique (coûts de la migration et les coûts d'archivage) et d'ordre sémantique (évolution des modèles de représentation de connaissances, nouveaux standards de méta données). Les réflexions à mener doivent s'inscrire dans la durée et les solutions proposées à l'échelle de plusieurs siècles, se focalisant notamment, à défaut d'une vision claire sur les technologies futures, sur les modèles de représentation et les outils d'annotation et d'interprétation des connaissances.

Pour le **big data**, les principales évolutions attendues concernent *l'automatisation des processus* d'extraction (métadonnées, connaissances, ontologies) et d'intégration des données et de gestion de la qualité; le développement de nouvelles méthodes d'analyse de données multi-sources (textes, réseaux sociaux, audio, vidéo, géolocalisation ...) et l'amélioration des performances (passage à l'échelle) ; la maîtrise et l'optimisation des architectures mixtes (données locales / distribuées) ; l'amélioration de la sécurité des infrastructures matérielles et logicielles, des collectes et des analyses; l'optimisation des mécanismes d'anonymisation et de cryptage garantissant la protection de la vie privée ; l'intégration des données et des analyses pour la sécurité (cyber-sécurité, gestion de crises, contrôle aux frontières) ; l'intégration et l'exploitation des *open data* (e-gouvernement, santé, impôts). En retour le traitement des grandes masses de données nécessite des avancées conceptuelles participant des mathématiques, par exemple méthodes statistiques issues du traitement des images.

Pour le **HPC**, la marche vers l'exascale se traduit par un nombre toujours plus élevé de cœurs éventuellement hétérogènes avec des accélérateurs de type GPU. L'exploitation efficace de ces nouvelles architectures devient plus difficile et peut inciter à l'émergence de nouveaux paradigmes de programmation (notamment pour le parallélisme massif et selon les sujets par langages dédiés). La consommation énergétique, le support d'exécution, les problématiques de tolérance aux pannes devront se traduire par des ruptures fortes. De nouveaux algorithmes mathématiques doivent être conçus à l'aune de ces nouvelles règles d'analyse.

En **simulation numérique** l'évolution des codes, la recherche de nouveaux schémas numériques ainsi que la conception de codes ultra parallèles au plus près des architectures, restant toutefois ouverts et évolutifs, seront des priorités. L'introduction de nouvelles méthodes mathématiques imaginées au plus près des applications sera source de progrès.

4.3 Ruptures technologiques /méthodologiques nécessaires

Pour initier ou accompagner ces évolutions, des ruptures sont à opérer.

Pour la **gestion de la connaissance et de la décision** dans le contexte **Big data**, il s'agit essentiellement de la capacité à déployer des chaînes de valorisation de la donnée de bout en bout : collecte et intégration de données variées, incomplètes, et pas seulement volumineuses ; fusion de données hétérogènes multi-sources ; stockage en bases NoSql, colonnes ou graphes ; algorithmes d'analyse distribués ; optimisation des modèles de distribution des calculs pour le passage à l'échelle ; optimisation de la sécurité des collectes et des analyses ; évaluation des performances des chaînes d'analyse ; chaînes de traitement pour les processus de production (usine numérique). Le développement de modèles statistiques pour le processus de décision séquentiel dans un flux continu et massif de données est un enjeu. L'accent doit être mis sur le traitement statistique de grands volumes de données, en particulier quand le nombre données est bien plus grand que la taille de l'échantillon.

Pour le **HPC**, les ruptures comprennent les processeurs multi cœurs / accélérateurs (éventuellement intégrés aux processeurs avec la fusion /convergence CPU-GPU chez AMD ou Intel) à basse consommation ; les micro-serveurs à base de processeurs ARM et GPU (e.g. projet Montblanc) ; les réseaux d'interconnexion à 100 GFlops (OpenFlow) ; l'enrichissement des langages de programmation, les bibliothèques hautement scalables et compilateurs. Les technologies matérielles basse consommation du HPC devraient contribuer aussi à la conception de plateformes big data plus efficaces.

Pour la **simulation**, les ruptures attendues sont : les méthodes numériques / la programmation / le développement de nouveaux codes ; la conception au plus près des architectures (co-design) ; la conception ouverte des codes permettant de les réutiliser et de les faire évoluer ; l'introduction de nouvelles méthodes mathématiques imaginées au plus près des applications; la meilleure prise en compte des incertitudes dans les calculs ; une nouvelle théorie de la complexité intégrant les déplacements et l'organisation des données et pas seulement le

volume des calculs. La capacité à coupler les approches par données (big data) et par modèles physiques (simulation) constituerait une rupture majeure.

La capacité à inter-opérer entre les domaines (gestion de la connaissance et de la décision, big data, HPC et simulation) serait une avancée fondamentale.

4.4 Principaux acteurs

Pour la **gestion de la connaissance et de la décision**, c'est plutôt le secteur industriel qui a été très tôt impliqué dans les développements, avec une croissance de plus de 10% par an depuis plus de 10 ans. De très nombreux acteurs sont actifs sur le marché des technologies de la *Business Intelligence* (BI), avec surtout des grands groupes américains (IBM, Oracle, Microsoft, SAS, MicroStrategy) ou SAP. Les grandes SSII ou cabinets d'étude généralistes (Cap Gemini, Atos, Accenture) ainsi que les SSII spécialisées (Business & Decision, Micropole-Univers, Keyrus), ont tous une activité très significative en BI. Mais les compétences en data mining (ou *predictive analytics*) sont beaucoup plus limitées.

Pour le **Big Data**, c'est aussi le secteur industriel qui est impliqué : PME (Temis, KXEN, Talend, Sinequa, Pertimm, Ubikod, Tynyclues, LexisNexis, Mondeca, 1000mercis, Skyrock, allociné, etc ...) ou entreprises plus importantes (Dassault-Exalead, Criteo, Thales, Cap Gemini, Atos, France-Télécom / Orange, SFR, etc ...), adressant les défis applicatifs du marketing, de la gestion des connaissances, du e-commerce, de la santé, de la business intelligence ; les grands comptes sont cependant encore peu présents. En France, le tissu académique dans la discipline est représenté par l'ensemble des grands centres de recherche nationaux engagés aussi bien en algorithmique qu'en recherche sur les infrastructures et les bases de données Big Data.

Par contre, **pour le HPC**, les plus gros supercalculateurs et leurs plus importants utilisateurs (simulation), sont actuellement essentiellement académiques. Ce sont leurs expériences technologiques de supercalculateurs, souvent prototypes, et le développement de méthodes numériques adaptées qui permettent d'essaimer vers le monde industriel, où l'on utilise couramment les architectures et les mêmes méthodes arrivées à un niveau de maturité avéré 2 à 3 ans plus tard. D'autres PME reconnues sont engagées sur le HPC (CAPS, Activeon, Silkan, Axalya, etc ...) ou la simulation numérique (AxesSim, Phimeca, Kitware Europe, Nuclétudes, Principia, etc ...), et notamment les sous-traitants de rang 1 de l'aéronautique (Altran, Aéroconseil, Sogclair, etc ...). Les grands comptes jouant un rôle majeur sur ce secteur sont notamment Schneider Electric, Dassault Systèmes, EADS, Total et EDF. Il est à noter qu'avec la société Bull, la France dispose d'un leader international dans le domaine des plates-formes HPC. Cette société est l'un des acteurs majeurs de l'« *European Technical Platform* », ETP4HPC.

4.5 Forces et faiblesses

Les **points forts nationaux** dans la **gestion de la connaissance et de la décision** et dans le **Big Data** sont une recherche académique de haut niveau et reconnue pour ses travaux en statistiques et en machine learning, son école statistique et en traitement des données expérimentales (IN2P3 avec le LHC par exemple); les compétences logicielles ; le dynamisme des entreprises innovantes positionnées sur ce secteur. La recherche concernant le middleware **HPC** est très visible au niveau national et international, en particulier dans les équipes Inria et CNRS. Pour les infrastructures, ajoutons une identification claire des acteurs fortement fédérés au sein du GENCI (représentant le France dans PRACE), du Centre de calcul mixte recherche-industrie du CEA, le CCRT, ou encore dans les initiatives méso-centres. Toujours dans le domaine du HPC, mais dans le domaine des technologies, la France est également un pilier de l'ETP4HPC. Pour la **simulation**, la France bénéficie d'une école de mathématiques appliquées et d'informaticiens d'excellence, ainsi que d'une base de codes

existants performants développés par diverses communautés scientifiques (climat, combustion, astrophysique, aérodynamique). Les éditeurs de logiciels (ISV) sont un élément clé de la chaîne, entre technologies et utilisateurs industriels (grands comme ESI Group, ou PME comme DISTENE).

Les **faiblesses** sont par ailleurs importantes : comme dans beaucoup de domaines techniques, nos domaines souffrent du manque de liens entre industrie et recherche académique, du manque de reconnaissance du doctorat dans l'industrie, d'une très grande balkanisation des équipes et d'une certaine désaffection pour les matières techniques. Mais, nous avons également des faiblesses spécifiques.

Si les organismes de recherches et les grands groupes industriels sont reconnus, il n'existe pas de grands leaders nationaux sur la **gestion de la connaissance et de la décision** et sur le **Big Data** : les techniques fondamentales ont été historiquement initiées aux États-Unis, et, aujourd'hui, les technologies de base et les infrastructures y sont concentrées. La France manque de grands « leaders » industriels du décisionnel et du numérique, sauf dans certains secteurs industriels (CEA, Dassault, Total, EDF, EADS) habitués à manier de très gros volumes de données ou chez les grandes SSII. Les investisseurs sont en France encore peu présents sur ces technologies, ce qui pénalise la création et la croissance de start-ups. Enfin, le domaine souffre d'un manque de personnel qualifié en Big Data : le *data scientist*, compétent en statistique mathématique et en informatique, apparaît comme le profil indispensable, mais les formations spécifiques sont tout juste en cours de création dans les universités et les grandes écoles.

La filière **HPC et simulation** est présente dans les formations de haut niveau en mathématiques appliquées (Polytechnique, Ponts, P6, P11, Cachan), mais manque encore de lisibilité (sur ses défis scientifiques et sur ses formations d'excellence), pénalisant ainsi une croissance endogène du tissu industriel (formation d'ETI et volume du nombre de start-ups sur le territoire).

4.6 Grandes priorités

Il faut renforcer la structuration des écosystèmes, à travers les financements publics (ANR, FUI, Oseo, BPI), les SATT et les Pôles de compétitivité pour créer des consortiums à taille critique.

Pour la **gestion de la connaissance, la décision** et le **Big Data**, il s'agit de développer la recherche pour maîtriser l'ensemble des technologies de la chaîne de valeur de la donnée ; renforcer l'offre de formation ; renforcer le tissu industriel (PME et grands groupes) et développer les ponts recherche – industrie et les équipes de R&D pluridisciplinaires ; développer l'exploitation des données open-source publiques ; favoriser la mise en œuvre de programmes de formation dans les universités et les écoles d'ingénieurs et accompagner la formation des enseignants.

Pour **HPC / simulation**, il faut favoriser les transferts d'IP, pérenniser les infrastructures et accélérer les usages ; appuyer la dynamique européenne Exascale ETP4HPC et PRACE ; faciliter les transferts d'IP vers les PME ; favoriser l'émergence des éditeurs logiciels ; renforcer les compétences académiques et promouvoir l'usage du calcul numérique dans l'industrie.

La mise en place de plateformes d'expérimentation cohérentes couvrant le HPC (via Genci/PRACE), la gestion de la connaissance, de la décision et le Big Data, le Cloud et les réseaux est un élément critique de performance de la recherche dans ces domaines. Un point fondamental de mise en œuvre est la formation d'équipes support pluridisciplinaires capable d'accompagner non seulement les chercheurs mais aussi les PME.

Enfin, ces écosystèmes ne peuvent être renforcés sans une action forte et ciblée sur la formation. A notre connaissance, il n'existe nulle part aujourd'hui un cursus de formation

intégrée sur la science des données et le HPC. Ce déficit trouve ses racines dans une segmentation trop classique des formations, ne tenant pas toujours compte de l'intégration des technologies et des besoins nouveaux des applications. L'autre point crucial est la désaffection des filières technologiques par les étudiants, due sans doute à de multiples facteurs (le peu de pénétration des sciences informatiques dans le secondaire et le lycée, le déclassement de nombreux diplômés d'ingénieurs n'offrant des débouchés que sur des postes de techniciens, la banalisation du mythe « nouvelles technologies » en une profession laborieuse de terrain n'ouvrant pas nécessairement des perspectives à des vraies « success stories »). Un grand chantier de revalorisation et d'incitation doit être lancé pour remobiliser les jeunes sur les filières technologiques.

4.7 Recommandations pour la mise en place d'un écosystème efficace

Nos recommandations visent au développement de chacun de nos 3 secteurs, ainsi qu'à l'organisation de leur rapprochement.

Pour la **gestion de la connaissance, la décision** et le **Big Data**, nous recommandons :

- Lancer un appel à proposition pour un programme MOOC intégrant obligatoirement universités, écoles d'ingénieurs et entreprises du secteur Big Data pour favoriser la formation et la constitution de consortiums à taille critique ;
- Créer des appels à projets ANR sur le Big Data et renforcer les FUI ;
- Cibler des appels à projets sur la création de plateformes expérimentales ;
- Développer des méthodes et des outils d'aide à la décision capables d'apporter une plus-value significative ou un gain effectif en productivité : en généralisant les outils d'analyse de données et en les déployant à grande échelle (à l'image de Google Analytics) pour démocratiser leur usage ; en soutenant des recherches sur l'extraction des connaissances (datamining) et l'apprentissage ainsi que sur la visualisation de grands espaces de données ; en soutenant des recherches interdisciplinaires sur la décision dans le pilotage de systèmes complexes ou dynamiques dans lesquels la multiplication des acteurs, la décision collective ou coopérative, la planification et l'exécution distribuée des actions, sont des enjeux majeurs. La nature des données (structure, vélocité), leur sémantique et leur qualité sont des paramètres importants dans ce domaine.

Pour le **HPC / simulation**, travailler à l'émergence d'une filière *computational science* (mathématiques, informatique), appuyée par des formations type master et école d'ingénieurs, cours en lignes à large diffusion (MOOC), formations courtes du type de celles données par les centres de calcul ou dans le cadre du PATC ; développer des actions s'inscrivant dans la durée avec une programmation des moyens et des investissements pérennes (aussi bien matériels qu'humains) ; travailler à une urbanisation des infrastructures de calcul et de données en lien avec les grands instruments (e.g. LHC), les plateformes expérimentales (e.g. séquenceur haut débit) et les systèmes d'observation (e.g. télescopes) dont les données – comme celles issues de grands simulations numériques – doivent être valorisées.

Pour le rapprochement des 3 axes, nous recommandons de faire émerger une communauté interdisciplinaire autour de la science des données par :

- La création ou la reconnaissance d'un ou plusieurs Centres d'excellence, regroupant des acteurs académiques et industriels des 3 secteurs : masse de données, HPC et simulation. Ces centres devront avoir une masse critique et une pérennité suffisante pour être compétitifs à un niveau international ;
- Le développement des infrastructures de gestion de données à grande échelle et de calcul intensif sur ces données ; la mise en réseau de ces infrastructures pour un traitement distribué et un passage à l'échelle de grande amplitude.

- Le soutien aux recherches sur la sémantique des données et sur les méthodes de raisonnement sur ces données, notamment dans le cas de données hétérogènes, incomplètes ou imprécises, résultant de multiples sources comme les capteurs ou les modèles de simulation. L'analyse de leur qualité, la crédibilité de leur origine, les transformations qu'elles ont subies et leur durée de vie sont des paramètres de nature à influencer sur leur interprétation.

Il faut mettre en place un *small business act* pour stimuler la création d'entreprises de services autour des données.

4.8 Recommandations recherche

Dans de très nombreux domaines scientifiques et socio-économiques (sciences fondamentales, économie numérique, informatique décisionnelle, environnement, sécurité, industrie...), l'exploitation des grands volumes de données maintenant disponibles et l'utilisation des capacités de calcul HPC a produit une *révolution des données* offrant de multiples opportunités de croissance et de créations d'emploi.

Pour saisir ces opportunités, il faut relever quatre grands défis :

1. **Capacité à déployer des chaînes de valorisation de la donnée de bout en bout** : collecte et intégration sémantique de données multi-sources et incomplètes ; automatisation de l'extraction des connaissances, des référentiels et des ontologies de domaines ; stockage en bases NoSQL, colonnes ou graphes et dans le Cloud ; nouvelles méthodes d'analyse hyper-parallèles ; sécurité des infrastructures matérielles et logicielles ; chaînes de traitement intégré pour l'usine numérique (PLM) ; protection de la vie privée et confiance de l'utilisateur.
2. **Capacité à inter-opérer les domaines (données, extraction des connaissances, aide à la décision, HPC et simulation)** : développement d'infrastructures de calcul haute performance et de stockage massif en nuage permettant le passage à l'échelle ; déploiement à grande échelle des outils d'analyse de données (data mining, text mining, visualisation) ; pilotage des systèmes complexes ; couplage des approches par données (big data) et par modèles physiques (simulation) ; proposition de plateformes pour l'expérimentation et les tests, accessibles aux équipes de recherche et aux entreprises.
3. **Extreme scale computing Exascale** : le calcul extrême représente un défi technologique majeur. Il s'agit d'apporter des solutions tant du point de vue des logiciels que des technologies matérielles afin de concilier parallélisme massif, efficacité énergétique et tolérance aux fautes. Ces recherches doivent être conduites dans le cadre d'une coopération européenne impliquant les acteurs de la recherche, les constructeurs (via ETP4HPC) et en coordination avec PRACE en charge des "infrastructures de calcul", tout en préparant le développement des applications qui s'exécuteront sur ces nouvelles architectures.
4. **Passage à l'échelle** : l'évolution vers les technologies du calcul massivement parallèle impose une rupture dans l'ensemble des méthodes de modélisation et de simulation numériques pour un passage à l'échelle des algorithmes et des applications. La prise en compte des processeurs many-cores et accélérateurs doit être intégrée dès la conception des méthodes pour prendre en compte la hiérarchie de parallélisme et la gestion des données.

Les approches devront être multi-disciplinaires (informaticien, analyste, data scientist, mathématicien, statisticien) et faire émerger une communauté interdisciplinaire autour de la science des données.

4.9 Retombées attendues

D'un point de vue économique, les domaines couverts représentent un gisement de compétitivité à appréhender sans délai, dans un contexte concurrentiel féroce avec le monde anglo-saxon, en s'appuyant sur des compétences scientifiques reconnues et des leaders industriels compétitifs. Les retombées seront en termes de points de croissance (40% de croissance du marché Big data par an jusqu'en 2015, selon IDC) ; de gains de productivité (dans le secteur public, réductions potentielles des coûts de 20% ; et dans le système productif, augmentation de 60% des marges d'exploitations selon McKinsey) ; de créations d'emploi (+50% en 10 ans d'après EMC2).

Par ailleurs, le développement de ces technologies aura un impact sociétal massif (société numérique) dans tous les secteurs, et en particulier pour le renouveau industriel, en permettant de déployer les *usines numériques*, clés de la relance de la compétitivité du secteur.

5. Interactions des mondes physiques, de l'humain et du monde numérique

Cette section concerne principalement les domaines de l'Interaction Homme-Machine (IHM), de la Réalité Virtuelle et Augmentée (RVA) et de la Robotique. Elle concerne également, pour les problématiques liées à des systèmes interactifs humains, l'acquisition des données à l'aide de capteurs (sons, images, signaux divers), le traitement du signal et des images, la production et la gestion de contenus multimédia, l'Internet des objets, les masses de données, la fouille de données et la sécurité informatique.

5.1 Forces et faiblesses de la France

Les domaines cités ci-dessus sont globalement moins développés en France que dans certains autres pays, notamment l'Amérique du Nord, le Royaume Uni et la Scandinavie. On trouve ainsi proportionnellement moins d'équipes de recherche spécialisées dans ces thèmes en France, et celles-ci sont souvent de petite taille. Par comparaison, on trouve ailleurs dans le monde des centres de recherche entiers consacrés à ces thèmes, comme le Human-Computer Interaction Institute (HCII) de Carnegie Mellon, le Media Lab du MIT, le Culture Lab de l'Université de Newcastle ou le Viktoria Institute en Suède. Pour ce qui concerne la robotique, les pays les plus avancés sont les Etats-Unis, avec des équipes dans les plus grandes universités américaines et des centres comme le Robotics Institute à Carnegie Mellon, le Japon et l'Allemagne, avec laquelle la France peut se comparer, et l'Italie. Il faut aussi noter une très forte activité en Suisse (EPFL et ETHZ), et un important développement en Corée et en Chine.

De façon similaire, on trouve peu d'acteurs industriels français dont ces domaines sont l'activité principale, alors que des entreprises ont pu se développer au niveau international avec un impact considérable (Apple, Facebook, jeux vidéos, iRobot, Google avec la Google car, etc.). Ces grands succès cachent de plus un nombre considérable de start-ups et d'entreprises petites et moyennes, ainsi que de nombreux développeurs indépendants (notamment pour le marché des apps pour smartphones et tablettes). Cet écosystème est lui aussi moins développé en France.

Ce retard peut en partie s'expliquer par le fait que l'Informatique en France est plus issue des mathématiques que de l'électronique, favorisant le développement de recherches et d'entreprises du logiciel « pur ». Ce retard est également lié à la difficulté de développer en France des collaborations interdisciplinaires. Dans les domaines traités ici, l'interdisciplinarité entre informatique, mathématiques appliquées, algorithmique, électronique embarquée, mécatronique, Sciences Humaines et Sociales, mais aussi le monde du Design et de l'Art est critique au niveau de la recherche et de l'enseignement, et pour favoriser le développement d'entreprises développant des produits et des services adaptés aux besoins de leurs utilisateurs.

Malgré ce constat, il convient de noter un certain nombre de forces et de succès, et une évolution favorable au cours de la décennie passée. Ainsi, un certain nombre d'équipes de recherche ont acquis une grande visibilité internationale, et on note plusieurs succès industriels dans des domaines tels que le haptique (Haption), la réalité virtuelle (Immersion), la robotique (Aldebaran), la 3D (Golem, Dynamixyz), les avatars (Cantoche), les capteurs et logiciels d'interface (MOVEA). On peut également noter la bonne position de STM dans le domaine des circuits intégrés très basse consommation et des capteurs MEMS (premier mondial).

Par ailleurs, ces problématiques sont centrales dans les pôles de compétitivité Images et Réseaux d'une part, Cap Digital d'autre part, dans les LabEx CominLabs, Persyval-lab et SMART, dans l'IRT B-Com, et font l'objet de trois Equipements d'Excellence : Digiscope (interaction collaborative distribuée), Robotex (robotique), AmiQual (intelligence ambiante), et de plusieurs grands équipements de réalité virtuelle (CEA, CNRS, INRIA) dont certains font partie du réseau européen Visionair. Ces thématiques ont également vu leur soutien se développer au niveau national, par exemple à l'ANR avec les appels à projets « Contenus et Interactions », dans le plan stratégique d'Inria, dont l'Interaction est l'un des quatre grands thèmes, et au CNRS.

5.2 Grandes tendances, ruptures technologiques et méthodologiques

L'informatique interactive a été l'un des moteurs du développement des STIC dans tous les domaines de la société : c'est grâce aux interfaces graphiques, développées dès les années 60 et commercialisées dans les années 80, que les ordinateurs personnels et aujourd'hui les smartphones et tablettes sont utilisés par des centaines de millions de personnes. Les tendances et ruptures de ce domaine sont organisées ci-dessous en cinq grands thèmes.

Nouvelles modalités d'interaction

L'intégration croissante des ordinateurs sous toutes leurs formes (PC, tablettes, smartphones, bientôt lunettes et montres) à notre environnement quotidien, combinée avec de nouveaux capteurs (caméras 3D, accéléromètres, capteurs biométriques, etc.) et la géolocalisation, permet de renouveler le vocabulaire et les modalités d'interaction : parole et gestes permettant l'interaction à distance, prise en compte des intentions de l'utilisateur et du contexte social, émotionnel et culturel de l'interaction, mais aussi interaction « passive » permise par l'inférence de situations d'interaction à partir de capteurs de contexte dans des systèmes ambiants, de capteurs biophysiques, voire de capteurs implantés, et des modèles d'analyse et d'interprétation de ces signaux. Une modalité telle que le BCI (interface cerveau ordinateur), en donnant accès à des informations jusque-là inaccessibles (état émotionnel, état de stress,...) est de nature à bouleverser les types actuels d'interaction et les modalités d'échanges.

La *multi-modalité* et *l'hybridation réel-virtuel* vont amener des ruptures dans nos modes d'interaction : la multi-modalité exploite les couplages multi-sensoriels et moteurs de l'utilisateur, tandis que l'hybridation réel-virtuel (comme la réalité augmentée ou mixte) réalise une intégration fine dans un même espace d'interaction d'éléments réels et virtuels. Leurs applications vont toucher en premier lieu l'interaction en situation de mobilité. Mais on observe également un regain d'intérêt pour l'interaction « en grand » : les salles immersives et interactives (3D, bientôt Ultra Haute Définition voire hologrammes) et les grandes surfaces interactives sont appelées à se développer dans le monde professionnel et les lieux publics, puis, à terme, à la maison. Le besoin d'accès distants fait que l'interaction collaborative distante avec des équipements hétérogènes va devenir primordiale tant dans le monde professionnel (bureau d'étude, médecine, jeux sérieux) que public (jeux, communication, tourisme, éducation, etc.).

L'enjeu majeur consistant à brouiller la distinction entre monde physique et monde informatique est d'offrir aux utilisateurs une gamme de paradigmes d'interaction adaptés (et adaptables) à l'expertise de l'utilisateur et à des tâches diverses : interaction classique des interfaces graphiques fixes ou mobiles, interaction immersive en environnement virtuel,

interaction mixte ou augmentée, interaction implicite où les intentions et états émotionnels de l'utilisateur sont directement pris en compte (notamment BCI), délégation de tâches via une interaction anthropomorphique (parole, gestes, agents conversationnels et avatars).

Le numérique support de l'activité collective

Bien qu'Internet ait permis le développement de systèmes de partage de connaissances, de documents et de ressource à grande échelle, l'utilisation réellement collaborative de l'ordinateur reste sous-développée. Certes les moyens de communication par Internet vont continuer à se développer, y compris les réseaux sociaux, mais des évolutions plus profondes sont à prévoir. D'une part le partage de contenu et surtout l'édition collaborative en temps réel de ces contenus va de plus en plus faire partie intégrante des environnements interactifs. D'autre part les modes de communication et de collaboration vont s'ouvrir à la cohabitation dans des environnements virtuels d'agents humanoïdes autonomes et des avatars des utilisateurs. Enfin une véritable rupture va se produire avec la capitalisation de l'intelligence collective ou *crowdsourcing*, qui va permettre de combiner intelligence humaine et artificielle pour créer des bases de connaissance, des services et des outils qui dépassent ce que l'humanité a pu créer jusqu'à présent.

Le premier enjeu de cette évolution vers l'ère post-PC est d'intégrer les capacités de communication et de collaboration non pas sous forme de services ou d'applications dédiées, comme c'est le cas actuellement, mais au cœur même des systèmes d'exploitation et des environnements interactifs, ne serait-ce que pour faciliter la collaboration avec soi-même, entre les différents appareils et services qui peuplent notre monde numérique. Ceci implique notamment une bonne interopérabilité entre les contenus et les applications. Le second enjeu de l'informatique collaborative est celui de la confiance des utilisateurs, de la sécurité des échanges et de la protection de la vie privée. La prise en compte des attitudes sociales, des états émotionnels et de modalités de délégation de tâches sont également critiques pour la diffusion de ces technologies. Enfin des modèles d'affaires adaptés doivent être développés pour reconnaître et rémunérer les contributions de chacun aux œuvres collectives ainsi produites.

Interaction avec les contenus, le Big Data et l'Internet des Objets

La consommation de contenus est l'un des vecteurs du développement récent des liseuses et tablettes. Ce marché va continuer à se développer avec une diversification des moyens de consommation de ces contenus, et donc le développement des applications correspondantes. On peut citer par exemple les applications cross-media ou celles dites de « second écran », qui utilisent une tablette ou un smartphone pour compléter le contenu affiché sur la télé.

On peut cependant craindre une concentration des éditeurs de ces contenus et sources de données. En effet, l'intermédiation entre ces sources brutes et l'utilisateur final va faire de plus en plus appel à des chaînes de traitement complexes et des bases de données gigantesques, accessibles seulement à quelques grands acteurs. Aussi le filtrage et la personnalisation sont aujourd'hui des enjeux stratégiques de l'accès démocratique à l'information, appelant le développement de standards internationaux, de solutions ouvertes ou d'alternatives nationales aux acteurs dominants. Contrer les risques de manipulation et d'exploitation des profils d'utilisateurs à leur insu réclame à la fois des solutions techniques et juridiques, et relève dans une certaine mesure de la souveraineté nationale. Par ailleurs, la création de contenus et de sources de données appelle le développement d'outils logiciels, notamment collaboratifs, adaptés aux différentes plateformes et aux différents publics visés,

du PC de bureau au smartphone, de l'éditeur professionnel à l'auteur individuel. Ce marché est donc lui aussi appelé à se développer pour répondre à la diversité des usages.

Outre les contenus, deux autres évolutions promettent d'amplifier le déluge de données auquel nous sommes soumis et donc les outils nécessaires de filtrage et de navigation permettant d'y faire face. D'une part, les données massives produites quotidiennement sont de plus en plus disponibles en ligne (Open Data). D'autre part, l'Internet des Objets promet d'associer une identité informatique à des quantités d'objets physiques et de parsemer le monde physique de réseaux de capteurs de plus en plus variés. Cette multiplication massive des points de collecte de l'information engendre des flots de données tels que de nouvelles stratégies d'acquisition sont nécessaires afin de réduire les flux dès le capteur, avec notamment le développement de capteurs intelligents. Ces sources d'information vont permettre de créer des outils d'agrégation, de fouille et de visualisation interactive de données aux possibilités nouvelles. On peut anticiper de nouveaux marchés stratégiques et de nouvelles applications emblématiques, comme les applications de guidage GPS rendues possibles par les bases de données cartographiques.

Enfin les systèmes électroniques vont être de plus en plus intégrés aux objets physiques. Cela conduira à développer des objets nouveaux et modifiera de manière radicale la manière de concevoir, produire, distribuer, utiliser et recycler les objets. Deux technologies clef sont cependant indispensables : une électronique très basse consommation (1000 fois moins que l'électronique actuelle) et une technologie hybride fiable combinant calcul et mémorisation d'une part, récupération et stockage d'énergie d'autre part.

Robotique de service

La robotique dite de service a connu un développement considérable ces dernières années, facilité par le développement et la réduction du coût des capteurs et des moyens de calcul. On distingue la robotique de service « professionnelle », avec des applications très diverses incluant le nettoyage, la logistique ou la surveillance, et la robotique « personnelle » utilisée par des personnes non spécialisées et le grand public. Un enjeu important de cette dernière est le contexte du vieillissement de la population qui motive en particulier les développements au Japon. Notons cependant que les applications les plus importantes aujourd'hui sur le marché concernent les aspirateurs robots (p. ex. Roomba de iRobot : 2,5 million d'exemplaire vendus) à cause de la maturité des technologies sous-jacentes.

Le développement de la robotique de service amène à considérer conjointement deux problématiques complémentaires : l'autonomie décisionnelle et opérationnelle du robot d'une part et l'interaction homme-robot d'autre part, qui doit être la plus simple et naturelle possible pour l'homme, avec des interfaces adaptées mais surtout des capacités d'interprétation par le robot des activités de l'homme. L'autonomie du robot facilite ainsi l'interaction qui peut être physique ou cognitive. Dans ce contexte les robots peuvent prendre plusieurs formes en fonction du besoin, induisant des modalités d'interactions différentes: humanoïde, exosquelette, manipulateurs mobiles, voire drones. La robotique nécessite une prise de décision en ligne reposant sur l'optimisation stochastique et le contrôle. Les enjeux de la recherche concernent donc ici ces deux volets, fortement liés : le développement de l'autonomie décisionnelle des robots (planification, prise de décision, architectures cognitives, apprentissage) et des capacités d'interaction. Les travaux sur la modélisation du comportement physiologique, biomécanique ou cognitif de l'homme prennent une importance particulière dans ce contexte.

Technologies numériques et Design

La démarche de « conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs » permet d'améliorer l'utilisabilité et l'acceptabilité des produits numériques. Bien que désormais définie par des normes ISO, elle est encore loin d'être mise en œuvre de façon satisfaisante dans le monde industriel. Elle est dorénavant complétée par la notion d'expérience utilisateur (UX pour *User eXperience*), qui intègre notamment les dimensions esthétiques et affectives dans la conception de produits nouveaux. Cette évolution nécessite de repenser les méthodes d'évaluation des interfaces homme-machine en incluant non seulement des mesures objectives de performance (temps, nombre d'erreurs) mais aussi des mesures plus subjectives liées par exemple aux réactions émotionnelles et à la qualité perçue des produits numériques.

Plus généralement, il est indispensable d'intégrer cette démarche dans une approche pluridisciplinaire croisant les compétences en sciences dures, en sciences humaines, en ingénierie et en design créatif. La recherche en *design d'interaction* est un sujet en pleine expansion en Amérique du Nord et dans le nord de l'Europe, mais peu développé en France. Ce domaine nécessite des collaborations croisées entre laboratoires et écoles d'art, de design et de création industrielle d'une part, d'informatique, de mécanique et d'électronique d'autre part, et aussi le cas échéant d'économie, de droit et de management. Cette démarche est particulièrement nécessaire avec la fusion du design produit et de l'interaction numérique, elle-même rendue possible par le développement des laboratoires de fabrication à faible coût (*FabLabs*) dans lesquels outils logiciels, imprimantes 3D, appareils de découpe laser et kits d'électronique embarquée permettent de prototyper et d'explorer, avec des cycles d'itération très rapides, les futurs produits numériques interactifs.

Processus de production

Les technologies numériques vont continuer d'avoir un impact profond sur les systèmes de production : l'usine numérique, permettant une simulation précoce et conjointe des nouveaux produits et de leurs systèmes de production, est en passe de devenir une réalité. De nouveaux enjeux émergent dans la capitalisation et la réutilisation des connaissances, dans un contexte distribué et collaboratif, pour permettre le développement de réseaux de production collaboratifs et agiles, locaux ou globalisés. Les notions d'intelligence ambiante ou de produit intelligent permettent par ailleurs d'envisager de nouveaux modes d'organisation et de gestion des systèmes de production, mais aussi de décloisonner les étapes du cycle de vie du produit, mettant en interaction concepteur, manufacturier, distributeur, usager, collecteur et recycleur dans un contexte de développement durable.

5.3 Avancées directement valorisables et génératrices d'emplois

Comme indiqué au début de cette section, la France n'est globalement pas dans une position de force sur ces thématiques. A court terme, elle doit donc capitaliser sur les atouts dont elle dispose. Ainsi, ses compétences dans l'industrie du logiciel, y compris du logiciel libre, peuvent être mises à profit pour développer des outils et des plateformes pour le développement de services et d'applications interactives. En effet, les coûts de développement de systèmes interactifs sont parmi les plus élevés du logiciel, d'une part à cause de la difficulté à tester correctement un logiciel interactif, d'autre part à cause de la diversité des plateformes cibles dès que l'on veut atteindre un large public. Des outils de développement adaptés peuvent donc rencontrer un marché constitué d'une part d'entreprises et d'autre part

de développeurs indépendants, avec des modèles économiques adaptés. Une cible d'intérêt est le Web 2.0, pour lequel les outils évolués de développement sont quasiment inexistants.

Toujours en capitalisant sur nos compétences dans le domaine du logiciel, le développement d'applications innovantes sur smartphones et tablettes peut rencontrer un large public : dans de nombreux domaines professionnels, où la migration vers les tablettes appelle l'adaptation d'applications métiers, mais aussi pour le grand public, qu'il s'agisse de jeux, de consommation ou de création de contenus, ou des services divers.

Plus généralement la combinaison des résultats de recherche sur le haut débit mobile, le stockage dans les nuages, et, au-delà des tablettes et smartphones, les nouveaux terminaux « objets » (lunettes, montres...), couplés à des interactions innovantes et sans latence en mode collaboratif déporté permettront le développement de nouveaux services dans de nombreux secteurs de la société numérique : maison et cité de demain, « smart home, smart cities », transport intelligent, formation, éducation en ligne, e-commerce, etc. Le monde de l'éducation en particulier est un marché à fort potentiel : le développement de jeux sérieux, d'agents pédagogiques et de plateformes d'éducation de type Moodle permettent une plus grande variété dans l'offre de formation, plus adaptée aux besoins de chaque utilisateur. L'automobile et les transports sont aussi un domaine avec un fort potentiel d'intégration de ces technologies interactives, avec par exemple un smartphone devenant l'interface du véhicule, mais aussi l'utilisation de technologies issues de la robotique. On peut également prévoir que quels que soient les secteurs, les seniors seront de plus en plus demandeurs d'interfaces adaptées.

Plus largement, le développement de plateformes et de composants de l'Internet des Objets qui amènent des informations de contexte et produisent des événements permettront d'alimenter de nouveaux services aux utilisateurs dans leurs diverses activités : transport, e-commerce, visites de musée, etc. En particulier, le développement de nouveaux capteurs combinant une partie matérielle et une partie logicielle peut capitaliser rapidement les travaux de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs, de la vision par ordinateur et des interfaces tactiles et haptiques. Les objets nouveaux, en tant que solutions d'instrumentation et d'interactions avec le monde physique, ont également de nombreuses applications grand public et professionnelles.

Enfin, le marché des pays en voie de développement présente des opportunités à exploiter rapidement car il sera sans doute bientôt saturé. Ces pays ont sauté plusieurs révolutions technologiques, avec par exemple des réseaux mobiles plus développés que les réseaux filaires et un plus grand nombre de smartphones que de PCs, mais ils restent confrontés à de nombreux problèmes liés à des besoins vitaux ou essentiels de leurs populations. Les technologies interactives et collaboratives peuvent être exploitées pour développer des services nouveaux de diffusion d'information, d'alphabétisation, de micro-économie, etc.

5.4 Priorités pour stimuler le renouveau industriel

La première action pour stimuler à moyen terme le renouveau industriel est de développer les liens entre informatique, mathématiques appliquées, électronique embarquée, traitement du signal et de l'image, mécatronique, sciences humaines et design en créant des équipes réellement interdisciplinaires, à tous les niveaux : dans les laboratoires de recherche, dans des structures telles que les IRTs ou les laboratoires communs recherche-industrie, et dans les centres de R&D industrielle. Cet effort doit impliquer non seulement les acteurs de la chaîne

de l'innovation, notamment les pôles de compétitivité, mais aussi les acteurs de la recherche académique et de l'enseignement supérieur, à l'instar de ce qui se fait dans les centres de recherche cités plus haut. La création de filières d'enseignement spécifiques doit notamment faire partie intégrante de cet effort, afin de former à terme des *designers d'interaction* capables de concevoir les futurs produits numériques.

La seconde priorité pour stimuler le renouveau industriel est de développer les approches agiles mêlant développement matériel et logiciel mais aussi usages et technologies afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs. L'avènement des ateliers de fabrication numérique (*FabLabs*) change radicalement le coût d'entrée pour développer de nouveaux produits. Ceux-ci peuvent être conçus, prototypés et testés pour une fraction du coût qu'il aurait fallu payer il y a quelques années. Développer de tels ateliers dans des structures coopératives (*Maker Movement* aux Etats-Unis), ou sous d'autres formes, permettra de stimuler l'entrepreneuriat et l'émergence de start-ups innovantes. Leur succès est également lié au développement de plateformes de *crowdfunding*, capables de démontrer rapidement l'existence (ou l'absence !) d'un marché.

Une troisième priorité est de stimuler les recherches et développements dans le domaine des technologies matérielles et logicielles réellement adaptées aux réseaux de capteurs distribués et à l'internet des objets, notamment sur la gestion de l'énergie, le packaging et l'intégration dans les matériaux, la reconfiguration matérielle et logicielle.

Enfin la nature diffuse des recherches et des technologies robotique en fait aussi un enjeu important dans plusieurs secteurs industriels, de la fabrication manufacturière (création d'emplois nouveaux ou récupération de la production grâce au paradigme de la robotique interactive), au développement de la voiture intelligente dont on anticipe l'arrivée sur le marché dans une dizaine d'années, en passant par la robotique domestique, grand public et d'assistance.

De façon générale, ces recherches nécessitent le développement de plateformes logicielles et matérielles spécifiques permettant des expérimentations en taille réelle : ateliers de fabrication agiles pour la co-conception de produits nouveaux, ouverts aux chercheurs comme aux entrepreneurs ; technologies interactives déployées dans des quartiers expérimentaux, comme les écrans interactifs publics d'Oulu (Finlande) ou du Quartier des Spectacles à Montréal ; plateformes robotiques permettant l'intégration des futurs robots sociaux ; « smart environments » pour tester les solutions d'intelligence ambiante ; etc.

Enfin, compte tenu de l'impact économique et sociétal de ces recherches, elles devraient également être mieux soutenues au niveau européen : à l'exception du programme Disappearing Computer du FP6 (2002), ces thèmes ont été peu financés par les appels à projets de l'UE. Plusieurs réseaux d'excellence ont cependant montré le potentiel de la recherche européenne, notamment INTUITION pour la réalité virtuelle, SIMILAR pour l'interaction multimodale, HUMAINE pour les interfaces émotionnelles, ENACTIVE pour l'étude de l'énaction et EURON pour la robotique. Aussi le développement de collaborations européennes, à l'instar du réseau Visionair de plateformes de visualisation, permettrait de combler plus rapidement le retard de la recherche française dans ces domaines.

6. Le numérique au service de la qualité de vie

La forte contribution du numérique à l'évolution de la société est aujourd'hui un fait établi. Le numérique apporte des infrastructures et des capacités d'automatisation et de traitement de données qui transforment toutes les activités humaines : la façon dont on conçoit, on produit et on commerce, la façon dont vivent les réseaux sociaux, la façon dont s'organisent les services et la vie collective. Ceci va toucher tous les secteurs d'activité : transport, santé, construction, éducation, commerce, culture et loisirs. Du point de vue de l'individu, le numérique prend une place de plus en plus prépondérante, investissant à la fois les cercles intimes, privés, professionnels et sociaux. Dans ce contexte, il est essentiel de s'interroger et de se positionner sur le lien entre numérique et qualité de vie, l'enjeu étant de faire du numérique un outil au service de la qualité de vie.

Selon une définition de l'OMS, la qualité de vie est « la perception qu'a un individu de sa place dans l'existence, dans le contexte de la culture et du système de valeurs dans lesquels il vit, en relation avec ses objectifs, ses attentes, ses normes et ses inquiétudes. Il s'agit d'un large champ conceptuel, englobant de manière complexe la santé physique de la personne, son état psychologique, son niveau d'indépendance, ses relations sociales, ses croyances personnelles et sa relation avec les spécificités de son environnement ».

Cette définition est large puisqu'elle porte sur une perception globale que l'individu a de lui-même et de sa place dans son écosystème. Il apparaît cependant clairement que le numérique concerne à la fois le champ de la santé et du bien-être, du niveau d'autonomie, des relations sociales et de l'environnement de l'individu.

Sur cette base, quatre domaines dans lesquels le numérique semble avoir un impact important sur la qualité de vie peuvent être considérés comme prioritaires : (1) santé et autonomie, (2) mobilité et transports, (3) sphère professionnelle et (4) liens sociaux.

6.1 Grandes tendances technologiques et méthodologiques

Santé, autonomie, bien-être

Le numérique est un outil puissant de transformation de la qualité de vie dans les secteurs de la santé et de l'autonomie. Il est un élément déterminant pour le progrès de la médecine : imagerie, traitement des données massives biologiques et médicales, aide au diagnostic et au geste médical. Plus encore, il peut être le vecteur de transformations du système de santé et de la qualité de vie associée, au travers de l'e-santé, de l'aide à l'autonomie et de l'accès aux connaissances de santé. Face à l'augmentation des dépenses de santé, au vieillissement de la population et aux pandémies de maladies chroniques, le numérique est un véritable levier pour la prévention, le traitement et le suivi de la santé des personnes et l'efficacité des systèmes de soin, éléments clefs dans l'amélioration de la qualité de vie.

La modélisation du vivant et son application à la santé ont conduit à des avancées remarquables. Le défi majeur est désormais d'intégrer les différentes échelles (spatiales et temporelles) du vivant, de la cellule, l'organe, l'individu, jusqu'aux populations et écosystèmes. Ceci passe par le développement de modèles numériques multi-échelles et hybrides pouvant être paramétrés par des sources de données multiples (génétiques, métaboliques, images biomédicales, cliniques, environnementales). Une dimension incontournable de ce paramétrage sera la prise en compte de la variabilité inter-individuelle (modèles "personnalisés") ainsi que des incertitudes de connaissances ou de mesures. Les

contributions numériques devront porter sur les grands défis de santé (cancer, maladies cardio-vasculaires et neurodégénératives, pandémies) à la fois en termes de modèles mathématiques, de développement d'outils de description des phénomènes biologiques et physiologiques, d'aide au diagnostic et à la prévention (imagerie multimodale), de traitement (pharmacologique, outils d'assistance au geste chirurgical) mais également d'aide à la rééducation.

Au-delà de la modélisation physiologique, la modélisation numérique de mécanismes cognitifs et psychologiques constitue un champ de recherche pluridisciplinaire en rupture, alliant les sciences humaines et sociales aux sciences du numérique. Dans ce domaine, qui doit rester particulièrement attentif aux questions d'éthique sous-jacentes, le couplage de modèles physiologiques, psychologiques et sociologiques sera porteur de questions de recherche dont la résolution permettra de mieux comprendre en particulier la notion de bien-être.

L'aide à la compensation de déficiences dues à l'âge, à un handicap, ou à une maladie, et l'élaboration raisonnée d'entités naturelles augmentées numériquement, comme par exemple des régulateurs cardiaques adaptatifs et auto-programmables jusqu'à des dispositifs de gestion du stress et du bien-être, seront également l'objet de recherches spécifiques.

Les sciences et technologies du numérique ont aussi un rôle à jouer auprès des personnes en bonne santé pour prévenir ou retarder l'apparition de maladies ou de handicaps. C'est tout l'enjeu du maintien en bonne forme ou du bien-être lié au « monitoring » d'activités (physiques ou sportives, par exemple), à des dispositifs de conseils ou de recommandations (alimentaires, par exemple) ou à des alertes préventives (en cas de dérives de certains indicateurs).

On peut citer dans le domaine de la santé l'apparition des premières générations de capteurs sensoriels et biométriques, parfois intégrés aux objets du quotidien (balance, montre, chaussures, fourchettes...), mais également les thérapies comportementales et cognitives proposées en ligne, pour la gestion du stress, du surpoids, des troubles du sommeil, des phobies, ou de toutes les formes d'addiction (tabac, alcool,..).

Mobilité et transports

Face au phénomène d'urbanisation croissante, concernant les métropoles et les territoires périurbains, les transports et la mobilité jouent un rôle déterminant dans la qualité de vie urbaine. Le numérique a la faculté à la fois de permettre d'optimiser les transports et de modifier la qualité de vie lors des phases de mobilité, transformant un temps de latence en un temps d'activité. Travail à distance selon diverses modalités, substitution de déplacement par dématérialisation, outils de fluidification du transport multimodal, accès aux services et géolocalisation dans les phases de transport, le numérique devient un outil au service de la qualité de vie.

La gestion intelligente des systèmes de transport requiert non seulement la collecte et le traitement de grandes masses de données mais aussi la capacité de mobiliser en temps réel des connaissances métier pour prévoir les conséquences des décisions possibles. La modélisation statistique a ici un rôle à jouer. Les plateformes numériques d'aide à la décision (notamment en cas de crise) devront permettre d'optimiser la fluidité du trafic et la gestion des ressources par les exploitants des services de transport (bus, taxis, parkings,...). Les systèmes d'informations multimodales regroupant l'ensemble des caractéristiques des modes de transport disponibles avec des éléments utiles pour le choix par l'utilisateur (situation prévisible au moment du déplacement, temps de latence, dépenses énergétiques, émissions

polluantes,...) favoriseront également l'amélioration de la qualité de vie durant les phases de mobilité.

Sphère professionnelle

La sphère professionnelle est également fortement concernée par l'impact du numérique sur la qualité de vie. En effet, toute personne en situation d'activité passe une part importante de son temps de veille soit sur son lieu de travail soit en situation de télétravail ou de mobilité professionnelle. Si les machines et l'industrie ont généré le modèle dominant du salariat que nous connaissons aujourd'hui, les nouvelles technologies et l'économie numérique pourraient bien être le vecteur d'une (r)évolution fondamentale de l'organisation du travail.

Sans contraintes (ou presque) d'horaires ou de lieux de travail, l'organisation de l'entreprise issue de la révolution industrielle et du taylorisme, avec son bureau unique et sa structure hiérarchique rigide, est selon bien des analystes en train d'exploser sous le coup des nouvelles technologies. Pour penser le travail de demain, on devra tenir compte des lignes de changement suivantes, qui sont toutes peu ou prou tirées par la métamorphose numérique :

- l'augmentation de la durée de vie qui va bouleverser la nature des études et des carrières, avec une alternance des cycles de formation et de travail ;
- l'automatisation de plus en plus grande du travail manufacturier qui va faire disparaître une partie du monde ouvrier traditionnel ;
- l'augmentation massive des capteurs et des puissances de traitement qui vont faire de la sphère du travail un monde de plus en plus programmable ;
- un total bouleversement des processus de création de valeurs du fait, entre autres, de la montée en puissance des réseaux sociaux ;
- une globalisation du monde toujours grandissante qui va mettre les notions de diversité et d'adaptabilité au cœur du fonctionnement et de l'organisation des entreprises.

Dans ce contexte, le numérique devra contribuer à favoriser une meilleure qualité de vie, à la fois au travail et dans la continuité sphère privée – sphère professionnelle. Néanmoins, des préoccupations sous-jacentes à cette évolution positive devront être : (i) la protection de l'individu de la permanence du lien avec son écosystème professionnel du fait des outils numériques de communication ; (ii) la préservation de son « intimité » au sein-même de sa sphère professionnelle, en évitant le syndrome « Big brother » de l'employeur ; (iii) la sécurité des données personnelles, les réseaux sociaux étant devenus également une source d'information sur les individus pour leurs parties prenantes professionnelles (recrutement, suivi de carrière,...).

Liens sociaux

Les liens sociaux sont à la fois le matériau et le ciment de la société humaine. La vitesse d'évolution du monde avec la spécialisation et la diffusion des activités humaines, leur densification et leurs rythmes, amènent à des demandes nouvelles de liens sociaux. Les réseaux sociaux, la création de services dans la gestion de la vie urbaine, familiale et personnelle, répondent à une forte demande d'amélioration de la qualité de vie.

Le numérique devient générateur de lien social. La prépondérance des liens sociaux virtuels sur les liens sociaux réels augmente de façon impressionnante. De nouveaux modèles d'interactions humaines soutenus par le numérique, basés sur l'échange de bien matériels et

immatériels, se mettent en place au niveau mondial. Dans le domaine de la santé et du bien-être, les fora de patients et de leurs entourages prennent de plus en plus d'espace, venant ainsi relayer et enrichir la relation interpersonnelle traditionnelle médecin – patient.

Dans les espaces urbains, on observe la naissance des cybercommunautés. Par exemple, dans le cadre de l'expérimentation du « Village virtuel » menée à Helsinki, les immeubles disposent d'un forum communautaire modéré par les habitants eux-mêmes ; des télé-services permettent de communiquer d'un appartement à l'autre ; et des écrans d'information disséminés dans la ville pour les habitants sont le terrain de test de nouveaux produits et services par une population informée et connectée.

6.2 Forces, faiblesses, opportunités

La France, et plus généralement l'Europe, sont des acteurs majeurs en termes de recherche scientifique dans le domaine du numérique. Nous disposons à la fois de grands organismes de recherches reconnus, d'équipes universitaires prestigieuses et de partenariats académiques et industriels solides.

Dans le domaine du numérique pour la qualité de vie, des initiatives récentes fédèrent les compétences ; on peut citer en France le Centre National de Référence Santé à domicile et Autonomie (<http://www.cnr-sante.fr/le-cnr-sante/>), ou au niveau européen la ligne d'action du KIC ICT Labs « Health and Wellbeing » dont l'objectif est de stimuler l'innovation pour améliorer la qualité de vie au quotidien et favoriser le bien-être à travers un mode de vie sain tout au long de la vie (<http://www.eitictlabs.eu/innovation-areas/health-wellbeing/>).

Dans le domaine de la santé, pour remédier aux problèmes liés à l'âge, un premier défi est d'utiliser les sciences du numériques dans leurs développements les plus récents afin de pallier à l'isolement, aux risques et au handicap. Tout doit être fait pour que l'allongement de la durée de vie ne soit pas une source de mise en situation de handicap. Trois grandes familles de technologies devront être développées visant respectivement (i) le corps vieillissant, (ii) la surveillance ou le « monitoring » de l'état de santé et de la sécurité de personnes âgées, dans un contexte individuel ou collectif et (iii) l'assistance aux personnes âgées ou aux patients à domicile dans les tâches de la vie quotidienne, en soutien ou en suppléance.

Le développement d'objets communicants tels que des capteurs portés ou non sur la personne nécessite la mise au point de dispositifs miniaturisés, communicants sans fil, de techniques numériques de communication, de protocoles de transmission et de standards d'interopérabilité. L'évolution vers des soins moins voire non invasifs contraint fortement ces nouveaux développements.

Des progrès récents ont été réalisés en sciences du numérique dans les domaines de l'analyse temps-réel de vidéo en vidéosurveillance, de la reconnaissance de gestes et de la synthèse d'avatars pour les jeux vidéos. Des efforts de même nature doivent être faits pour la compréhension du corps vieillissant et le suivi de l'état de santé et de sécurité des personnes âgées. En particulier, des recherches doivent être conduites en analyse de signaux multi-capteurs pour la reconnaissance d'activités cognitives et motrices et en synthèse pour la modélisation de l'état du patient virtuel.

Par ailleurs, dans le domaine de la robotique, les innovations évoluent d'une robotique industrielle vers une robotique de services intégrant des systèmes sensorimoteurs

sophistiqués, voire une robotique cognitive communicante visant un type d'interaction de « haut niveau », de plus en plus naturelles, avec l'humain pour l'accomplissement de fonctions complexes notamment dans la sphère domestique. Des recherches doivent être menées dans ce domaine pour l'assistance aux personnes âgées ou aux patients à domicile pour les tâches de la vie quotidienne.

Enfin, pour que ces recherches soient pertinentes et efficaces, il est particulièrement important de mettre en place des équipes pluridisciplinaires ou des coopérations très étroites entre équipes de recherche en sciences du numérique et en gériatrie, et de développer des compétences en *gérontechnologies*. L'objectif sera de concevoir de nouvelles méthodes depuis la spécification et la modélisation, jusqu'à l'évaluation sur et par des cohortes de personnes âgées.

Dans le domaine de la maîtrise des grandes masses de données numériques et des réseaux sociaux, les grands acteurs mondiaux sont américains, chinois ou russes. L'opportunité pour la France serait de stimuler la mise en place d'une politique nationale, européenne voire mondiale, de protection des données personnelles numériques, étape incontournable dans l'élaboration d'indicateurs d'amélioration de la qualité de vie (préservation de la vie privée, droit à l'oubli,...).

Dans la perspective des villes numériques durables, les initiatives de développements urbains des métropoles et territoires français telles que le projet du Grand Paris constituent également autant d'opportunités de mettre les innovations issues des sciences et technologies du numérique au service de la qualité de vie. Dans ce cadre, un axe de recherche et d'innovation important qui contribuera à l'amélioration de la qualité de vie est celui soutenant une approche systémique de l'activité humaine. Dans cette approche, la cité désormais perçue comme un être vivant animé par un système nerveux numérique sera devenue l'espace d'optimisation de la qualité de vie. L'individu devra alors être traité dans sa globalité selon les dimensions spatio-temporelles de son activité, à la fois dans le court et le long terme, selon un modèle qui peut être qualifié de « fractal ». Les différents temps de sa journée et la transition entre ces temps seront examinées à l'aune d'un niveau acceptable de qualité de vie. La même approche pourra être appliquée à des phases de vie plus longue. Ainsi, les indicateurs de qualité de vie devront devenir des contraintes à prendre en compte en amont dans la conception des technologies et des services. En termes de recherche, cette approche devra conduire à un fort décloisonnement des disciplines et au renforcement d'activités éminemment inter, pluri ou transdisciplinaires, alliant en particulier sciences humaines, du vivant et du numérique.

6.3 Perspectives sur l'emploi et le renouveau industriel

Les industries de la qualité de vie constituent un secteur stratégique dont le poids économique et le potentiel de croissance sont considérables. La « santé et l'économie du vivant » a été identifié comme l'une des trois priorités techniques et industrielles du rapport « Pacte pour la compétitivité de l'industrie française » de Louis Gallois en novembre 2012. Mais il faut également y ajouter les industries du bien-être, associées à une évolution sociétale vers une prise en charge plus active par l'individu de la préservation de sa santé.

Avec l'essor de l'internet des objets et le développement de la ville intelligente dans toutes ses composantes (transport, énergie, sécurité, logement, éducation, culture, santé, communication, loisir), le numérique va jouer un rôle considérable en se concevant comme le

système nerveux de la cité de demain. Parmi les axes d'innovation potentiellement porteurs d'emploi, on peut citer notamment les réseaux de capteurs (y compris sur soi – le « wearable » embarqué dans les vêtements ou dans d'autres accessoires), les architectures M2M, l'accès pervasif, les « smart grids », les services web.

Les applications des technologies de l'information et de la communication au service de la personne représentent un enjeu scientifique, médical et social considérable. Les retombées économiques sont attendues en termes de réduction des coûts liés à la santé, mais également en termes de créations d'entreprises et d'emplois. A titre d'exemple, dans le domaine de la chirurgie mini-invasive guidée par l'image, les premiers succès sont apparus il y a une dizaine d'années, et l'extension à d'autres pratiques chirurgicales et médicales, rendue possible grâce à une imagerie sophistiquée, l'informatique, la robotique et des technologies de télécommunication avancées, reste prometteuse.

La dynamisation des secteurs innovants des industries de santé comme les dispositifs médicaux, l'imagerie *in vivo*, la « e-santé », le traitement des données, la chirurgie ou encore la robotique sont devenus une nécessité, voire même une urgence, d'autant plus que ces secteurs reposent sur une recherche fondamentale et technologique française de très haut niveau. L'acquisition de compétences et de technologies numériques dans ces industries laisse entrevoir le développement de produits et services très innovants.

Dans le domaine de l'imagerie médicale (radiographie, échographie, endoscopie), c'est l'augmentation considérable de la résolution des senseurs et leur miniaturisation qui offrent de nouvelles perspectives. Les axes sur lesquels on pourrait se concentrer sont justement la définition et la sensibilité des images obtenues et les modèles et outils d'analyse de ces images.

En ce qui concerne les dispositifs médicaux, où le marché des équipements/matériels médicaux est dominé par les acteurs nord-américains, les axes d'innovation recommandés pourraient être les systèmes de diagnostic et de traitement multi-pathologie, ainsi que les systèmes d'évaluation et de rééducation sensori-motrice et/ou cognitive basés sur la réalité virtuelle ou augmentée.

Enfin, dans le marché de la télémédecine et de l'e-santé, encore naissant, le numérique apportera une contribution incontournable pour (1) le maintien en autonomie de la personne et/ou du patient, (2) l'accès aux services distants et (3) la gestion de l'information patient-aidant-soignant.

L'e-santé est au cœur des stratégies actuelles, tant au niveau national qu'europpéen. A travers les dossiers médicaux électroniques, auxquels pourront être reliées l'ensemble des analyses biologiques mais également d'imagerie c'est une autre façon d'appréhender le diagnostic et la décision des soins à délivrer qui va se développer. La télésurveillance facilitera l'accès aux soins et au diagnostic aux patients en perte d'autonomie, ou souffrant de maladies chroniques et à ceux vivant dans des zones moins urbanisées. Les enjeux globaux de l'e-santé sont donc de réussir une adaptation majeure de l'offre de soin « bousculée » par la transition épidémiologique, l'évolution démographique et l'évolution des pratiques médicales, tout en prenant en compte l'acceptabilité pour le patient et sa confiance.

Il s'agit aujourd'hui de déterminer à quel rythme et selon quels mécanismes, notre système de soins va s'intégrer dans la vie quotidienne et pour répondre à quels enjeux ? Les scénarios les

plus réalistes reposent sur l'émergence de nouveaux dispositifs accessibles par Internet, reliant des outils de « quantified self » et de « e-learning » (« serious gaming ») dans des plateformes ou réseaux sociaux médicalisés, permettant aux citoyens de mieux gérer leur santé en relation avec des professionnels et des prestataires de services. Ces dispositifs auront pour fonction principale d'inciter leurs utilisateurs à mieux gérer leur « capital santé » en agissant principalement sur les mécanismes de recherche d'une meilleure qualité de vie. La dématérialisation de nombreuses prestations n'empêchera pas l'émergence d'une véritable filière de « coaching » qui sera source de création de nombreux emplois sur l'ensemble du territoire.

Au regard des économies réalisables sur le coût des soins, le changement des comportements de vie des citoyens est un enjeu sur lequel de nombreux acteurs sont prêts à investir. Cependant, la mise en œuvre de ce type de dispositifs ne pourra être opérationnelle sans un approfondissement des connaissances dans les domaines de la sociologie, la psychologie et l'éthique. Une évolution importante du cadre juridique dans lequel cette nouvelle filière de la télésanté s'opèrera devra aussi être anticipée.

Les mécanismes d'appropriation reposeront également sur un effort important en termes de design et de nouvelles méthodes de co-élaboration tel que le concept des « living labs » semble le préfigurer. Le domaine des sciences humaines devra donc jouer un rôle central.

L'encouragement de ces différents domaines prometteurs passe par un certain nombre d'actions transverses dont la mise en place d'une réflexion sur la manière de mieux définir, cibler, traiter et exploiter l'énorme quantité de données médicales potentielles et réellement recueillies lors de la prise en charge des patients, dans le cadre des approches de médecine personnalisée, en particulier en lien avec les données personnelles issues des nouvelles technologies (outil de séquençage) afin de mettre en place des outils d'aide à la décision pour une thérapie ciblée et efficace sans effets secondaires. Ainsi une politique nationale de santé plus pertinente, incluant la sécurisation des données, conduirait à une forte diminution des coûts de santé et à un meilleur bien-être du patient. Le transfert de technologies vers les acteurs de ces segments avec une prépondérance de PME et d'entreprises traditionnelles, représente un défi économique et industriel majeur pour la création de sociétés compétitives sur le plan européen.

7. Réseaux numériques à hautes performances

Cette thématique couvre les technologies, architectures et infrastructures des réseaux numériques à hautes performances ainsi que leurs intégration et interaction avec les systèmes de communication et les systèmes distribués de stockage, de calcul et de contrôle, ceci dans un contexte large allant de l'Internet des Objets au Cloud Computing en incluant les services associés tels que la distribution de contenus. La notion de « haute performance » dépasse ici largement celle du passage à l'échelle en termes de capacité pour englober entre autres une meilleure adaptation aux évolutions des services dans une logique de meilleure intégration technologique de la chaîne de valeur, le passage à l'échelle du nombre de dispositifs connectés et l'automatisation des processus opérationnels.

La recherche dans ces domaines scientifiques et techniques devra permettre l'émergence d'une offre compétitive des industriels français pour l'internet des services.

7.1 Inventaire des Forces & Faiblesses

Faiblesses

L'évolution des services et usages et le « tout-IP » a favorisé le développement de l'intelligence des systèmes de communication et d'information aux extrémités des chaînes de la valeur : dans les data-centres d'acteurs globaux et dans les terminaux et dispositifs personnels. Les industriels de ces domaines ne sont pas Européens.

Certains de ces acteurs sont en train de densifier fortement leurs points de présence, en déployant des centres de données plus proches des usagers finaux. De ce fait, la virtualisation des fonctions de réseau facilite leur positionnement dans les marchés historiques des opérateurs de réseaux de télécommunications.

Cette tendance favorise clairement les acteurs capables de déployer de très grandes capacités de stockage et de traitement à une échelle mondiale. En d'autres termes, une densification des data-centres d'entreprises globales (comme Google qui, de plus, déploie maintenant de l'accès haut-débit) conduira à limiter le rôle des réseaux. Il y a ici un risque important d'un affaiblissement de la France.

De plus, la situation actuelle restreint le positionnement de la France au transport des informations et limite fortement son positionnement au niveau applicatif, largement dépendant de la capacité à traiter et/ou à valoriser ces informations.

Forces

Les besoins des services et applications de demain imposent une meilleure intégration des divers composants de la chaîne de valeur (cf. Internet des Objets, terminaux/dispositifs personnels, réseaux, Cloud, gestion et distribution de contenu, etc.). Les acteurs des réseaux européens ont les compétences requises pour jouer un rôle central dans ces évolutions vers plus d'intégration. Dans le domaine du Cloud, si le retard en innovation est clair, les compétences scientifiques nationales existent.

Les architectures de demain seront basées sur de nombreux nouveaux paradigmes. Sur certains, les Etats Unis ont pris le leadership, comme par exemple avec le SDN (*Software Defined Network*). Néanmoins, la définition des solutions actuelles est très immature, ce qui laisse un espace de repositionnement pour lequel des compétences scientifiques Françaises existent.

Les infrastructures futures ne pouvant continuer à être aussi centralisées qu'aujourd'hui, il y a une opportunité pour les acteurs locaux à rivaliser avec les majors nord-américains, en accroissant la valeur ajoutée produite par les réseaux nationaux. Cette approche intégrative, concentrant les objectifs de qualité, de sécurité et d'ouverture d'une fédération d'acteurs d'industries hétérogènes, contribuera à la mise en place d'un espace de services et de mobilité européen. Dans ce schéma, nous trouvons une France forte.

Les Intranets des Objets et l'évolution vers un Internet des Objets sont fortement dépendants des industries verticales et la France compte des leaders mondiaux dans certaines filières comme l'énergie et le transport. Les compétences scientifiques françaises pourraient déboucher sur un leadership mondial, notamment grâce à la mise en place d'alliances multi-industries : des télécoms à l'énergie et les transports, en passant par le Cloud et les services associés, par exemple.

Les concepts d'objets communicants et d'Intranet d'objets ouvrent de multiples opportunités, notamment en forme de marchés de niche accessibles aux PME et aux ETI françaises. Le positionnement dans la maîtrise de la conception des objets liés à diverses industries verticales représente également une force pour la France. Les opportunités sont nombreuses : l'innovation peut révolutionner le produit ainsi que l'outil de production (usine du futur), l'information et les services associés peuvent être valorisés en dehors du marché national.

7.2 Analyse des tendances, évolutions, ruptures

La nouvelle ère des communications, dans laquelle nous rentrons lentement mais sûrement, sera caractérisée par l'accélération importante du déploiement et de l'usage de services et d'applications disruptifs. Des paradigmes relativement récents faciliteront le rapprochement et la fusion progressive des mondes réels et numériques, et seront accélérés par l'évolution des interfaces entre tissus organiques et machines, par les interfaces cerveau-machine et les avancées des neurosciences⁶. En conséquence, la généralisation de l'usage de nouvelles applications produira un impact majeur sur la santé, l'environnement, l'énergie, le transport, etc.

Le futur Internet permettra à des milliards de dispositifs de partager des capacités de calcul et de stockage. Ce potentiel de partage dynamique et souvent spontané des ressources les plus diverses, nécessitera l'orchestration de services dont les possibilités seront incommensurables. Les technologies et architectures de réseaux devront évoluer, non seulement en termes de capacité mais également en termes de fonctionnalités.

Beaucoup d'objets de notre quotidien, aujourd'hui neutres et fabriqués par des filières industrielles traditionnelles, intégreront demain des capteurs et des moyens de communication sans-fil pour se connecter aux réseaux numériques, contribuer à l'intelligence ambiante et offrir de nouveaux services. L'intégration de fonctions électroniques dans ces objets est maintenant envisageable grâce aux ruptures en termes de miniaturisation et intégration des micro-technologies et nano-technologies.

Le « *Cloud Computing* » sortira des grands centres de données et intégrera, dans une architecture distribuée, tout un écosystème de dispositifs numériques fournissant des ressources (smartphone, tablette, passerelle résidentielle, ordinateur personnel, nœud de réseaux, etc.).

Les solutions de « *Big Data* », facilitées par ces évolutions du Cloud Computing, joueront un rôle majeur. Outre leur intérêt dans les applications de demain, elles permettront de mettre en place de nouveaux paradigmes d'opération des réseaux et des plateformes de service. En

⁶ Certains annoncent déjà la fin de la civilisation telle que nous la connaissons d'ici deux générations (voir les derniers ouvrages de Ray Kurzweil).

effet, les technologies de *Big Data* permettront de développer des plans de connaissance avancés de ces systèmes, en traitant de manière efficace les informations collectées à la fois sur l'état des systèmes et sur les échanges qui s'y effectuent.

Les réseaux sociaux continueront à se généraliser. Des recherches sémantiques sur les contenus qu'ils génèrent dynamiquement seront possibles, menant à de nouveaux paradigmes de gestion, de partage et de distribution de ces contenus, qui eux-mêmes seront de plus en plus diversifiés, bien au-delà de la vidéo.

L'ensemble de ces évolutions et la transposition de l'ensemble des services à un contexte de mobilité généralisée, dépassant les frontières des technologies d'accès, des terminaux et des domaines administratifs continuent à soulever des questions technologiques. Elles sont notamment prises en compte dans les travaux actuels vers la 5G.

Ces tendances soulèvent de nombreux défis scientifiques, techniques et socio-économiques, dans une perspective de développement durable et d'écologie. Quant aux enjeux socio-économiques, ils se jouent dans une arène internationale extrêmement concurrentielle : l'ensemble des pays industrialisés investit fortement, notamment en recherche, dans ce domaine.

7.3 Propositions d'avancées

Aux défis scientifiques impactant les technologies et les systèmes des réseaux numériques à hautes performances listés ci-dessous, sont associés des exemples de sujets à traiter.

- **Augmentation de la capacité dans les réseaux et notamment, dans un contexte de mobilité généralisé, dans le réseau d'accès.**

Technologies optique et radio pour dépasser les bornes actuelles de capacité ; nouvelles technologies de fibre (notamment multi-cœur) et composants adaptées ; traitement tout-optique du signal ; optique en mode paquet pour une optimisation des ressources ; réduction d'un facteur de 10 du coût des composants pour arbres optiques passifs ; accroissement de l'intelligence de couche physique pour une diminution globale des coûts ; nouveaux formats de modulation ; amélioration de l'efficacité spectrale ; compensation électronique des distorsions ; adaptation dynamique au contexte d'utilisation ; MIMO en réseaux ; rayonnement et compatibilité électromagnétiques ; densification des stations de base ; coopération de stations de base ; communications directes entre terminaux ; communications très hautes fréquences.

- **Architectures de réseaux et de services flexibles, efficaces et fiables.**

Convergence des architectures et protocoles fixe-mobile au plus près des terminaux pour faciliter une vraie continuité de services (en cas de changement de réseau d'accès) et pour multiplier les capacités de communications de terminaux (quand plusieurs accès pourront être utilisés simultanément).

Continuité des services dans un contexte de mobilité généralisée, réseaux tolérants aux pannes et aux délais (DTN – *Delay Tolerant Networks*).

Réseaux centrés contenus permettant d'optimiser le fonctionnement des réseaux via des nouveaux mécanismes et protocoles, en particulier pour le transport des contenus audiovisuels qui constituent une part majoritaire du trafic.

Interconnexion et fédération de réseaux et systèmes hétérogènes ; interconnexion réseaux et services dans un contexte multi-domaine (cf. inter-Cloud, fédération) ; nouveaux paradigmes : brokers de services et de réseaux, nouveaux modèles d'affaires rendus possibles par des approches d'interconnexion évoluées.

Conception et optimisation jointe des réseaux, des nouveaux systèmes de transmission, des solutions de Cloud Computing et des services. Virtualisation coordonnée et à tous les niveaux.

Distribution partielle du Cloud sur les équipements réseaux et autres dispositifs connectés.

Virtualisation de bout en bout des infrastructures réseaux (Cloud Computing, ...), des services et des applications, pour tendre vers les réseaux programmable (SDN : *Software Defined Network*) : les services, de plus en plus nombreux, ont des demandes de plus en plus hétérogènes vis-à-vis du réseau. Pour ajuster dynamiquement les performances réseaux à celles requises par les applications, il convient d'introduire des capacités de programmation dans les fonctions de réseau, et une des pistes est de virtualiser certaines fonctions de réseau pour, tout en s'appuyant sur une ressource de base commune, fournir à chaque application le service dont elle a besoin, quand elle en a besoin et où elle en a besoin.

Langages dédiés à la composition de services et évolution des techniques d'ingénierie logicielle facilitant la construction d'applications distribuées prenant des décisions à l'exécution et non plus à la conception/compilation.

Prise en compte des contraintes spécifiques aux environnements tels que la ville intelligente, les espaces intelligents, le support aux systèmes de santé, le maintien à domicile, la surveillance, etc.

Fiabilité/résilience des systèmes notamment ceux intervenant dans la santé des individus et la sauvegarde de l'environnement.

L'explosion du nombre d'objets mis en réseaux induit la nécessité d'auto-organisation de systèmes intelligents capables d'acquiescer et de traiter localement des informations, de prendre des décisions et d'agir sur leur environnement. Nouveaux paradigmes de mise en réseau passant à l'échelle, métrologie et modélisation, maîtrise de la complexité. Auto-organisation sensible aux applications et au trafic, capture, agrégation et traitement décentralisé, notamment dans le réseau, des données captées. Transport en contexte de mobilité de trafics avec des contraintes spécifiques, auto-adaptation et auto déploiement des infrastructures en fonction des évolutions applicatives.

- **La sécurité, la confiance et le respect de la vie privée.**

Conception de systèmes communicants garantissant la sécurité des usagers et des données, développement des services assurant aux auteurs/usagers la maîtrise du cycle de vie des données injectées sur le réseau (oubli numérique) ; modèles de confiance et protocoles associés pour développer différentes fonctions du réseau, cryptographie et cryptographie quantique, concept de *privacy by design* et recherche liant le respect de la vie privée aux aspects légaux ou sociétaux.

Intégrité et authenticité des systèmes, technologie et architecture des composants micro-électroniques pour améliorer la résistance aux attaques physiques (modification matérielle d'un système connecté pour mener une attaque réseau)

- **Intégration système et déploiement.**

L'intégration de fonctions électroniques au sein d'objets très hétérogènes, en particulier des fonctions de connectivité sans-fil aux réseaux numériques, soulève de nombreux défis. Les ressources énergétiques et les ressources de calcul qui peuvent être embarquées sont limitées ; la connectivité ne peut être indépendante d'un compromis entre performances, ergonomie et coût. Les défis scientifiques sont alors dans la modélisation de systèmes complexes, la miniaturisation et l'intégration de l'électronique, l'efficacité énergétique des systèmes de communication et de calcul, la connaissance des perturbations liées aux environnements de déploiement etc. Les défis technologiques concernent l'optimisation du système embarqué pour le service selon des critères haut-niveau comme les performances, la miniaturisation du

dispositif communicant, les contraintes de déploiement pour l'utilisateur, l'autonomie énergétique, l'auto-configuration etc. On peut considérer que les meilleures chances de succès seront données aux approches transversales et par l'appréhension de l'usage réel.

- **Les nouveaux modèles économiques qui restent à inventer.**

Des acteurs nouveaux, tels que les brokers de réseaux et de services seront nécessaires pour cacher les complexités et hétérogénéités sous-jacentes aux usagers et pour leur permettre de tirer le meilleur profit des multiples réseaux et services mis à leur disposition. Nouveaux modèles économiques permettant de résoudre les tensions actuelles entre fournisseurs de services « *Over The Top* » et de services réseaux.

- **La gouvernance, la régulation, la gestion de la neutralité et la normalisation**

Dans un contexte d'enjeux socio-économiques et de compétition mondiale jamais connus à ce jour, la normalisation aura un impact majeur sur l'émergence d'un Internet des Objets et des services associés car elle définira les modalités de qualification des systèmes communicants en particulier pour des applications qui devront garantir performances et sécurité (santé, transports connecté etc.).

- **La maîtrise de la consommation d'énergie et du contrôle des radiations,**

... dans un contexte de développement durable, sont des enjeux majeurs. Les recherches concernent la consommation d'énergie des infrastructures de communication et des services mais également les diverses applications ayant un impact sur la consommation énergétique globale et les modèles de consommation énergétique.

La recherche devra assurer le questionnement de la société sur l'impact du déploiement de réseaux radio communicant sur les écosystèmes dans les différentes bandes de fréquences envisagées aujourd'hui. Les réseaux devront avoir une consommation proportionnelle en énergie. Cette proportionnalité, associée à des améliorations matérielles et logicielles contribuant à réduire les consommations énergétiques d'un réseau, permettra une parfaite adéquation entre la consommation et le trafic.

7.4 Identification des priorités

Le champ de recherche de la thématique « RESEAUX NUMERIQUES A HAUTES PERFORMANCES » couvre un grand nombre de sujets devant être priorisés. La liste suivante tente d'identifier les priorités classées par ordre décroissant permettant de stimuler le défi du renouveau industriel recherché.

- ➔ Les futurs réseaux mobiles représentent un maillon indispensable aux diverses évolutions évoquées. La France doit avoir une présence forte dans les initiatives européennes sur le sujet (notamment dans le PPP 5G en cours de montage) et dans les instances de normalisation.
- ➔ Les architectures convergentes et programmables basées sur des infrastructures virtualisées, apporteront la flexibilité requise dans un domaine où les évolutions des services et des usages se font à des échelles de temps de plus en plus courtes. Il est ici indispensable de concevoir des solutions tendant à une meilleure intégration à la fois verticale du Cloud et du réseau et horizontale des réseaux opérés et des intranets des objets. Ces architectures devront intégrer les terminaux et les dispositifs personnels qui feront partie des solutions de Cloud du futur, notamment en tant que passerelles entre objets communicants, intranets des objets et infrastructures.

- ➔ Les intranet / Internet des Objets, et leur intégration technologique dans la chaîne de valeur des services de demain, pour le support d'applications transversales à diverses industries (i.e. énergie, transport, bâtiment...), constituent les facteurs clés du potentiel d'innovation des TICs.
- ➔ La fédération d'architectures et d'acteurs hétérogènes permettra un meilleur positionnement dans le marché global des systèmes numériques de demain. Des solutions pour une automatisation des processus de fédération et d'orchestration des services sont nécessaires.
- ➔ L'intégration dans ces systèmes - dès leur conception - de mécanismes de sécurité ainsi que la prise en compte des contraintes de confiance et de respect de la vie privée deviennent critiques face aux nouveaux risques induits par les nouveaux services, sur de multiples aspects de la vie des citoyens et sur les processus des entreprises, infrastructures et organismes publics.
- ➔ La prise en compte et si possible l'anticipation de l'évolution des usages et des modèles économiques, dans la conception jointe services/réseaux ainsi que l'implication des usagers en tant que fournisseurs de contenu, d'applications voire de ressources, mènera à des solutions créatrices de valeur.
- ➔ Les réseaux centrés contenus assurant l'intégration verticale des solutions réseaux, du Cloud Computing, de la gestion et traitement des contenus, permettront de faire face à l'explosion des contenus en termes de volume mais également en termes de diversité (notamment celle induite par l'Internet des Objets).
- ➔ La prise en compte des aspects technico-économiques (interconnexion, neutralité, etc.), réglementaires et normatifs requiert des solutions techniques spécifiques, notamment de mesure et de contrôle.
- ➔ L'automatisation des processus opérationnels permettra la facilité d'usage et la maîtrise de la complexité indispensables au succès des services de demain.
- ➔ L'amélioration des technologies, composants et systèmes permettant la montée en débit des transmissions sur fibre optique, notamment dans les réseaux d'accès, est incontournable.
- ➔ La conception, le développement et la mise à disposition d'outils et infrastructures d'expérimentation, d'évaluation et de validation, notamment pour des expérimentations intégrant des mesures à grande échelle, représentent un outil essentiel à la prise d'une position forte.
- ➔ La prise en compte de l'empreinte écologique (consommation d'énergie, rayonnement électromagnétique) de tous les éléments de la chaîne de valeur limitera les éventuels freins au développement massif et à l'acceptabilité des services de demain.
- ➔ De manière orthogonale à ces priorités, des challenges de recherche fondamentale devront être levés. Nous pouvons citer: auto-organisation, auto-adaptation, tolérance aux pannes, optimisation, métrologie, théorie des réseaux, théorie des communications (incluant l'unification théorie de l'information et trafic), nouveaux modèles économiques et énergétiques, gestion du risque, sûreté de fonctionnement ainsi que les outils de modélisation de vérification, d'exploitation et de supervision. La modélisation des composants, des équipements, des architectures, mais également des environnements de déploiement, représentent un atout majeur pour la conception de systèmes performants et adaptés aux besoins des usagers.

8. Maîtrise des composants nanoélectroniques et nanophotoniques

L'enjeu est de maîtriser la conception et la réalisation des composants qui seront à la base des futures infrastructures numériques, de l'*advanced manufacturing* et des futurs produits de grande diffusion dans les domaines de la santé, de l'environnement, de l'habitat, du transport et du numérique nomade .

Pour cela il s'agit de combiner portabilité ou intégrabilité, consommation réduite, traitement d'information en temps réel et capacités d'apprentissage, personnalisation des applications, en gardant la maîtrise des composants et de la sécurité des systèmes.

Aujourd'hui, la France dispose dans ce domaine d'importants atouts avec une base industrielle composée d'acteurs de rang mondial et de PME de haute technologie, et de capacités de recherche de premier plan. Dans un contexte hautement concurrentiel, préserver et développer des capacités d'innovation technologique et de production nationale sur les composants est un impératif de compétitivité et d'indépendance sur un vaste ensemble de filières industrielles, bien au-delà du cœur constitué par les industries de la nanoélectronique et de la photonique.

Les principales filières technologiques au cœur de ces enjeux sont :

- La nanoélectronique, diffusante dans les micro et nanotechnologies, et à l'origine des principales ruptures qui, selon le dernier rapport de Mc Kinsey, auront le plus d'impact sur la société et l'économie à compter d'aujourd'hui jusqu'en 2025. Les progrès de la nanoélectronique déterminent par exemple la croissance des capacités de calcul et d'apprentissage et le potentiel du *big data analytics*. En particulier la perspective des circuits électroniques performants (vitesse), à basse consommation (green IT) : la filière française FDSOI, autour de STMicroelectronics et SOITEC a démontré en 2013 sa compétitivité sur ces deux plans.
- Les circuits nanophotoniques permettant le transport optique de hauts flux de données, en intra ou inter-puces, de nouveaux types de capteurs/senseurs mais aussi l'intégration de fonctions plus complexes et de nouvelles architectures de traitement combinant silicium/matériaux III-V et photonique : la filière photonique silicium & III-V, soutenue par l'IRT nanoélectronique en lien avec STMicroelectronics, le III-V Lab, et les acteurs du design se situent au cœur d'une rupture technologique majeure qui s'adosse à des secteurs aussi importants que les télécommunications optiques , et par des recherches dans les laboratoires académiques (IEMN, IEF, INL, ...).
- Les capteurs et actionneurs à la base des interfaces entre monde réel, personne et électronique, la nanomécanique, le traitement du signal, ... De nombreuses PME et startups sont actives dans ce domaine générateur d'emplois et de services nouveaux.

Des briques critiques comme l'intégration hétérogène 3D sont essentielles à maîtriser pour faire surgir des innovations à partir de la combinaison des filières technologiques ci-dessus.

De même le socle de caractérisation, de modélisation et de test est indispensable pour comprendre les mécanismes à l'origine des fonctions actives et passives des composants.

Il est aussi à noter, au-delà de la convergence photonique-électronique, la nécessaire convergence avec la nano-mécanique.

Sur l'ensemble du secteur, il est important de réussir :

- Au niveau national :
 - Le couplage entre les programmes français et les initiatives européennes afin d'amplifier l'effet de levier et de réunir la masse critique nécessaire. Les grands groupes leaders de filières françaises doivent en particulier voir leur initiative de renouveau industriel renforcée ;

- un couplage accru entre entreprises, notamment entre grands groupes, PME, ETIs, et TPEs, et la recherche technologique afin de rendre accessible les technologies innovantes les plus matures ;
- le renforcement du dispositif Carnot en support à la recherche technologique et partenariale, en particulier au sein de filières d'avenir et de plateformes ouvertes ;
- une cohérence dynamique entre recherche amont, recherche technologique et industrie afin d'oser des sauts technologiques en s'appuyant sur un socle solide de connaissances, sur des plateformes technologiques et sur des lignes pilotes de pointe (en nanoélectronique : ST, SOITEC, PdC Systematic, Minalogic, IRT nano ; en photonique : ALCATEL, THALES, SOFRADIR, ULIS, Optics Valley, Photonics Bretagne, Route des lasers, IRT BCOM) ;
- un couplage dynamique entre formation et recherche technologique, afin de préserver et renforcer les capacités d'innovation nationale.
- Au niveau européen : dans le cadre d'initiatives KETs/multiKETs, la préparation d'actions de lignes pilote et de prototypage, contribuant à ancrer la production des composants en Europe. En particulier, à court terme, les projets ENIAC et ARTEMIS dans lesquels les industriels français jouent un rôle majeur dans l'effort de réindustrialisation, à moyen terme, les flagships et l'EIT. Les PME doivent par ailleurs disposer d'un outil spécifique pour participer à l'entreprise d'innovation portée par les KETs.

8.1 Grandes tendances, grandes évolutions, ruptures technologiques ou méthodologiques

L'ensemble des évolutions ci-après décrites se situe dans un contexte général de prise de conscience des enjeux critiques associés à la maîtrise des technologies clefs et des capacités de production industrielle. Ces enjeux portent sur l'emploi direct et le développement des services associés, et, spécifiquement pour les composants issus de la microélectronique, sur la capacité d'innovation et la prise de leadership sur un vaste ensemble de technologies. L'un des challenges pour les futurs systèmes de traitement et de transmission de l'information est d'augmenter le débit tout en diminuant de façon très significative la consommation d'énergie.

Les évolutions technologiques structurantes concernent :

- *Sur le plan des applications* : 1. Les systèmes embarqués multimédia hautes performances et à basse consommation issus de la convergence des technologies des serveurs et des dispositifs nomades capables de traiter de vastes masses de données, en intégrant des fonctionnalités additionnelles de plus en plus complexes (prise d'image, localisation, capteurs diversifiés, ...). 2. L'électronique de capteurs intelligents et communicants se diffuse dans toutes les applications et plus d'usage, grâce à des dispositifs miniaturisés et hétérogènes intégrant une fonction de microcontrôleur.
- *Le co-design et la co-intégration* qui couplent de plus en plus intimement et précocement le développement des composants, des architectures et des logiciels (informatique distribuée ou cloud), et les technologies de plus en plus diversifiées de la nanoélectronique (imageurs, capteurs de mouvement, de champs électromagnétiques, capteurs chimiques...). En plus de la puissance de calcul qui reste le critère déterminant pour le calcul haute performance, la valeur d'usage ainsi que le champ de l'innovation, sont, de manière croissante, associés à ces fonctionnalités multiples.
- *Les technologies basse tension et basse consommation* entraînant des ruptures technologiques comme la technologie FDSOI développée par ST, SOITEC et le LETI permettant une performance accrue pour une moindre consommation. A moyen terme, des micro-dispositifs pour le stockage ou/et la récupération de l'énergie, y compris

pour des capteurs complètement autonomes (dits abandonnés) : batteries organiques, composants thermoélectriques, ... sont attendus.

- Le retour des *technologies de rupture* comme les *interconnexions optiques intra et inter-puces*, le *traitement du signal tout optique* et l'*introduction de nouveaux matériaux* : III-V, à plus long terme graphène, oxydes métalliques, du fait du ralentissement de la loi de Moore illustrée par les temps de développement plus longs et les coûts de plus en plus élevés des technologies sub 20nm.
- *Le développement du « more than Moore »* dans lequel l'Europe se distingue avec des capacités de fabrication en 300 et 200mm et des industriels leaders comme ST : mémoires embarquées, RF, imageurs, capteurs, composants optiques, composants de puissance, ...
- Le développement en particulier de *nouvelles technologies de mémoire* compatibles des technologies de microélectronique (spintronique, mémoires résistives, OXRAM, PCRAM, CBRAM, ...) et pouvant s'adapter à de nouveaux paradigmes de traitement d'information combinant calcul et mémoire dans une approche système.
- *Les technologies de la photonique*, aux performances nouvelles et aux champs applicatifs étendus par une intégration croissante et des fonctionnalités qui deviennent compatibles des technologies de la microélectronique et de la nanomécanique : Ainsi, la photonique sur silicium apparaît à présent comme la solution incontournable pour les prochaines générations de circuits photoniques. la convergence des circuits électroniques et photoniques sur une même puce rendant possible le traitement de l'information au plus près de l'émetteur et du récepteur. On peut également citer la plasmonique, les cristaux photoniques et métamatériaux, les sources et imageurs THz, et plus généralement sources photoniques intégrées, sources pour l'UV, l'IR, composants optiques, technologies de cryptographie, lidars, lasers, horloges et micro-horloges, gyros, ingénierie des matériaux, qui impliquent la maîtrise de l'intégration de technologies hétérogènes.
- La rupture des télécommunications optiques actuelles, dite « cohérente », qui induit une nouvelle instrumentation avec un fort renouvellement au niveau des composants : à base consommation, ultra rapides (sub et Thz), ultra stables, permettant l'échantillonnage optique, sensibles à la phase pour permettre l'implémentation des méthodes de codages de nouvelle génération. Mais aussi l'enjeu de l'optique pour l'accès : composants très bas coûts pour les marchés de masse.
- *Le développement de technologies différenciées* sur les divers champs applicatifs, telles que l'électronique organique (composants souples) pour des applications de niche à forte valeur ajoutée (applications nomades, dispositifs médicaux,...)
- *Le développement de la conception de circuits et de systèmes numériques* (MP SOC, NOC, ...) qui est un lieu de recherche actif : concepts en rupture en lien avec les composants, comme par exemple l'architecture des calculateurs neuromorphiques, réduction de la consommation par un management adapté de l'énergie, intégration de capacités de traitement sophistiqué adapté aux applications visées (analyse de données sonores ou visuelles, capacité d'apprentissage). La complexité croissante des puces doit également être accompagnée par des techniques d'architectures nativement résilientes aux fautes et au vieillissement des composants, et dans le cas d'applications sensibles, robustes aux intrusions d'attaquants extérieurs. Enfin, les performances des composants notamment analogiques commencent à bénéficier de l'introduction d'algorithmes numériques nativement intégrés compensant par calcul les limitations technologiques.

- *Les architectures reconfigurables* sont ainsi en essor, liées à l'évolution des produits en fonction des nœuds technologiques (3000 produits en technologie 40nm, 100 produits en technologie 10nm).
- *Les micro- et nanosystèmes* (BioMEMS, Microsources d'énergie, Microcomposants pour les communications -MEMS RF, MOEMS-, Micro- nanorésonateurs pour la détection physique ou chimique), dont les domaines d'application sont extrêmement nombreux.
- *Les nouveaux matériaux* comme le graphène et les nouveaux lamellaires 2D offrant de des performances accrues, au stade actuel principalement en cours d'études dans les laboratoires académiques, voient déjà les premières applications se dessiner.

Associées à ces évolutions technologiques, plusieurs évolutions méthodologiques ou de contexte sont déterminantes pour la compétitivité du dispositif de recherche et d'innovation :

- *Le rôle déterminant de clusters*, de taille critique, associant sur un même territoire recherche amont, recherche technologique et acteurs industriels. La complexité des défis scientifiques et technologiques implique de plus une mise en réseau efficace de ces clusters, ici aux échelles nationale et européenne. Ces clusters comprennent nécessairement un ensemble de plateformes technologiques de fabrication, de caractérisation avancée, de simulation numérique et de design de premier plan. Ces plateformes diversifiées doivent répondre d'une part aux enjeux du transfert industriel, et d'autre part permettre l'exploration agile des idées de rupture.
- *Le développement de modèles de simulation numérique* au caractère prédictif, d'un apport déjà essentiel pour la compréhension anticipée des phénomènes et demain indispensable pour la conception des nouveaux matériaux et le design des futures générations de composants.
- Les acteurs gagnants s'appuieront dans ce domaine sur des équipes de taille croissante, aptes à se situer tant sur le développement des codes que sur leur mise en œuvre, ce qui constitue un enjeu organisationnel fort. L'analyse des besoins et la comparaison internationale montrent que cette dynamique s'appuie nécessairement sur l'accès à des *moyens de calcul intensif maintenus au meilleur niveau*.
- *La recherche intégrative* : l'association nécessaire, à des TRLs de plus en plus précoces, des développements de la physique ou des matériaux, et de la réflexion sur le design et l'architecture des composants : les propriétés de nanodispositifs élémentaires (comme les synapses pour les architectures neuromorphiques) impactent radicalement les architectures à mettre en œuvre, et les architectures possibles des dispositifs renforcent la viabilité technologique de nouveaux matériaux ou nanodispositifs élémentaires (traitement d'erreur,...).
- La diffusion généralisée de *l'approche « démonstrateur »*, permettant la démonstration de fonctionnalité physique aux TRLs les plus amont ou la validation des étapes d'intégration technologique aux TRLs intermédiaires. Cette approche conditionne une progression rapide de l'innovation. Comme cela a été identifié au niveau européen, il est important de disposer ensuite de plateformes technologiques permettant un transfert vers des lignes pilotes industrielles destinées à la production, validée sur des séries limitées.
- *La méthodologie de test* prenant en compte les nouvelles technologies de systèmes complexes et les technologies d'intégration de type 3D, technologies hétérogènes, ... Elle doit être accompagnée, pour les puces complexes, de *méthodologies de preuve formelle*, nécessaires à la détection des bogues de conception avant fabrication.
- Une diffusion des technologies in fine déterminée par *une valeur d'usage* (et donc un marché) définie par le consommateur. La prédiction, associée à des enjeux technologiques et économiques considérables, est ici complexe. L'analyse des usages

et des impacts (industriels, économiques, sociétaux...) doit associer très tôt sciences économiques, sociales et humaines.

- L'intégration des PME dans les programmes de recherche et les mécanismes de l'innovation rendue possible par des outils spécifiques : travail avec les grappes d'entreprises, simplification des procédures à l'adresse des PME, programmes favorisant les échanges académiques/PME, l'accès des PME aux grandes plateformes, ...

8.2 Avancées significatives, directement valorisables et génératrices d'emplois

Les développements scientifiques et technologiques associés aux composants pour les technologies de l'information et de la communication restent dans une dynamique de ruptures régulières, alimentant l'innovation, le développement industriel et l'emploi :

- *Nanoélectronique* :
 - l'introduction de la technologie FD SOI au nœud 28nm par STMicroelectronics et le LETI se traduit par un gain de 30% en consommation ou en performance, permettant ainsi de gagner environ 5 heures de consultation Web sur un smartphone. Un premier produit a été présenté en décembre 2012 et est en cours d'évaluation chez plusieurs clients. Cette avancée majeure renforce le rôle de locomotive de la filière nanoélectronique ;
 - les développements de la photonique (silicium et III-V) répondent aux enjeux de traitement à haut débit de l'information, en offrant une connectique rapide intra/interpuces ou -composants et ouvrant des possibilités de nouveaux senseurs/capteurs et de nouvelles architectures de traitement ;
 - les nouvelles technologies de mémoires non volatiles (spintronique, PCRAM, OxRAM, ...) offrent non volatilité et capacité d'intégration élevée : elles ouvrent la voie à une électronique embarquée reprogrammable (aux performances optimisées pour le calcul à effectuer) ou/et au «normally off computing» (le circuit n'est plus alimenté en dehors des phases de calcul actif, avec un gain en consommation pouvant dépasser 10 pour certaines applications).
- *Photonique*
 - La révolution des technologies de communication WDM a laissé place à une nouvelle rupture technologique aussi importante avec l'avènement de technologies hybrides optique/électronique. En introduisant massivement des techniques de communications numériques auparavant inaccessibles, elles ont permis de multiplier les débits. Ce changement de paradigme lance de nouveaux défis technologiques qui devraient remodeler en profondeur l'infrastructure des réseaux optiques, depuis la partie cœur jusqu'à l'accès. Cette transformation, potentiellement porteuse d'emploi, doit être accompagnée par un effort de recherche depuis la conception des composants jusqu'aux routeurs et l'architecture de réseau.
 - Le surgissement parallèle de nouvelles filières technologiques, notamment la nanophotonique sur silicium ou la plasmonique, constitue une situation d'opportunité pour chacun de ces secteurs très favorable à l'émergence de nouveaux marchés.
- *Intégration hétérogène*
 - Le mariage de la photonique et de l'industrie de l'électronique est générateur de ruptures dans de nombreux domaines :STIC, instrumentation, capteurs,

environnement, défense, énergie,..., pouvant donner naissance à de nouvelles entreprises.

- L'intégration 3D de composants hétérogènes, utilisée par exemple pour les imageurs (ADConverter sous imageurs) ou pour l'empilement mémoire sur logique, permet un traitement intelligent et efficace de l'information en mettant au plus près les différentes puces. Cette approche permet de mixer des technologies différentes et de diminuer les coûts des dispositifs à miniaturiser.
- De même l'assemblage hétérogène de semi-conducteurs III-V sur silicium (collage moléculaire ou épitaxie localisée) permet d'allier les caractéristiques spécifiques de ces composés (rapidité, puissance, propriétés électro-optiques) à la force de l'industrie micro-électronique du silicium. En termes de marchés accessibles, il est à souligner que les matériaux III-V, comme la convergence annoncée entre les composants III-V sur des substrats silicium, permettent d'attaquer des marchés de niche (telecom, sécurité & défense, ...) à très haute valeur ajoutée où la France et l'Europe possèdent des atouts importants à faire valoir.
- *Les composants spécifiques*, largement utilisés dans les domaines du transport, de la santé, nécessitent des développements de circuits et de designs, sources de différenciation d'autant plus grande qu'ils mettront en œuvre des technologies pionnières digitales, analogiques, d'intégration, d'assemblage et de packaging.
- *Technologies associées :*
 - Les progrès des composants de puissance à base de GaN (dépôts sur de grandes surfaces, nouvelles architectures) permettent d'apporter des solutions aux besoins d'alimentation de circuits ou de dispositifs tels que les chargeurs d'appareils électroniques (laptop, ...).
 - Les fonctionnalités multiples permises par des capteurs toujours plus intégrés accéléromètres 3D, gyromètres, magnétomètres, capteurs de pression, capteurs chimiques, biologiques, environnementaux...) révolutionnent de vastes domaines, en apportant des solutions nouvelles, souvent à des coûts drastiquement réduits : technologies pour les transports, jeux, surveillance médicale, examens biologiques, technologies de sécurité, ...
 - Au-delà de l'impact déjà fort sur le marché, le potentiel d'innovation est encore considérable dans ce domaine, reposant sur des ruptures dans le domaine des matériaux (piézomatériaux, métamatériaux,...) et des traitements et fonctionnalisations de surfaces.
 - Les technologies de traitement d'information embarquée, comme la fusion de données, représentent un enjeu considérable dans l'exploitation interne des données issues de capteurs intégrés.

Dans plusieurs des domaines ici cités, la soutenabilité des développements en cours repose sur la recherche et la mise en œuvre de *matériaux de substitution* aux matériaux rares utilisés parfois car indispensables aux technologies existantes.

Les *moyens de caractérisation et d'instrumentation* de haute précision sont à la base du développement des matériaux et des dispositifs.

- *Maitrise des systèmes :*
 - Composants MP-SOC , NOC, ... systèmes complexes pour lesquels des industriels comme THALES, EADS, ST sont bien positionnés.

- Objets communicants, internet des objets, réseaux ad hoc, domaines dans lesquels la France et l'Europe jouent gagnant.
- Sécurité embarquée au niveau système, circuit et composants, preuve de sureté des systèmes embarqués. Ces domaines sont à la pointe en Europe (automobile, aéronautique, sécurité, santé).
- Electronique basse consommation.
- Electronique RF et analogique : vers le THz et le sub-millimétrique où l'Europe est très présente.
- Composants optiques bas coût, pour plus de débit et moins de consommation aussi bien en télécom (FTTH) qu'en imagerie, senseurs, lasers, éclairage, ... : domaine générateur d'emplois qui nécessite une approche couplée composant-architecture.
- Communication wireless et optique (power to home, RLDO : réseaux locaux domestiques optiques, ...).

8.3 Forces et faiblesses

Des champions industriels bien implantés sur le territoire national sur différents segments de la chaîne de valeur : fabricants de matériaux et composants ⁷ comme STMicroelectronics, SOITEC, GEMALTO, SOFRADIR, ULIS, IPDIA, ALTIS, LFondry, 3SPhotonics, OMMIC , UMS, intégrateurs comme Thales, Alcatel, EADS, éditeur de logiciel comme Dassault Systèmes, fournisseur de systèmes d'information ouverts comme BULL, opérateur comme Orange, permettant de construire des filières industrielles leader en Europe ou à l'international.

- La présence d'IRT dans les systèmes : SystemX, Nano, BCOM.
- Une présence forte dans les marchés professionnels, de la défense et de la sécurité, des *smart systems*.
- Une dynamique de création de start-ups soutenue par des mesures incitatives.
- De forts clusters pluridisciplinaires associant recherche amont, recherche technologique et acteurs industriels, particulièrement à Grenoble (nanotechnologie, Design Center), en région PACA (Silicium, sécurité), à Saclay (III-V, nanodesign) mais aussi à Toulouse, Lille, Limoges, Besançon (mécanique), Bretagne (télécoms) ...
- Une recherche fondamentale de qualité (illustrée par les ruptures obtenues en spintronique, ou par la position au premier rang de la France sur le Flagship Graphène). Il est indispensable donc que la chaîne : laboratoires académiques – centre de recherche technologique - industriels se mettent en place pour accroître la présence française dans les grands programmes européens comme le KET Flagship Graphène.
- Des éléments de compétitivité forts et attractifs : dispositif du crédit d'impôt recherche, réseau des Instituts Carnot, excellent niveau de formation.
- Le réseau des grandes centrales de technologie soutenu par le programme national RTB, réparti sur l'ensemble du territoire national, et associant centrales du CNRS (réseau RENATECH) et centre de recherche technologique (CEA-Leti), qui apparaît comme un élément indispensable de compétitivité pour conduire les recherches technologiques de base, et par suite pour le développement économique du secteur au travers des transferts de propriété intellectuelle et de savoir-faire vers les grandes entreprises ou les start up. La coordination de ce réseau avec celui composé de Centrales de Technologie de taille moins importante et souvent plus spécifiques dans un domaine donné, adossées aux laboratoires académiques, est indispensable pour

⁷ Rapport L Malier à la demande du Ministre chargé de l'industrie- juillet 2010 « Les sites français de production en micro-nanoélectronique » -

optimiser ce potentiel national, unique dans le panorama européen, mais également international.

Les faiblesses :

- Manque de consolidation :
 - entre recherche amont et recherche technologique (sous-exploitation des filières très avancées de nanocomposants, pas ou peu de basculement à TRL3 entre preuve de concept au niveau laboratoire et démonstrateur technologique TRL4-5) ;
 - entre technologie et intégration dans ses diverses composantes : logiciel embarqué, association de fonctionnalités mais aussi packaging, qui s'avère le maillon critique pour passer d'une puce à un module réellement exploitable industriellement.

Par exemple, concernant les microsystèmes : si certains composants sont actuellement produits en très grand nombre (accéléromètres, capteurs de pression, micromiroirs ...), beaucoup restent encore limités à des développements académiques. Une approche « système » incluant l'intégration des sources d'énergie, les connexions électriques, les interconnexions, le packaging, les méthodes de conception, de test et de caractérisation doit être soutenue pour faire émerger de nouveaux produits

- Une recherche sur objectif peu ou pas assez développée : le schéma actuel pour les laboratoires académiques « techno-push puis start-up » est trop réducteur, se privant de la phase d'intégration système qui permet d'évaluer la faisabilité d'un démonstrateur technologique.
- Pour les communautés du design, un accès insuffisant aux technologies avancées, en particulier là où les industriels français sont pionniers, comme le FDSOI, mais aussi pour les prochaines technologies type GaN, III-V, ... pour la réalisation de démonstrateurs ou de petites séries.
- Une présence insuffisante de la communauté française sur plusieurs secteurs du PCRD européen en lien avec les enjeux ici traités.
- Une dynamique RTB fragilisée alors que l'investissement et la mutualisation des équipements de fabrication amont dans une logique de feuille de route CNRS-CEA a démontré son effet de levier au niveau européen et son attractivité pour les PME et TPE technologiques. Le projet I2N proposé pour prendre la suite du programme RTB prévoit par ailleurs un volet design, un volet d'ouverture aux laboratoires académiques et une coordination avec le réseau des centrales dites de proximité, évoqué ci-dessus.
- Un sous-investissement public européen au regard de l'investissement public massif accompagnant les grands pôles mondiaux en microélectronique (Albany (IBM) de l'ordre de 10 B\$ depuis 2000 et une accélération ces dernières années, aide étatique apportée à Samsung (Capex 2012 : 13 B\$), à TSMC (Capex 6 B\$) permettant de rivaliser avec Intel (capex 12.5 B\$). Cette situation est d'autant plus critique que les seules capacités de fabrication, d'innovation et de maîtrise des composants les plus avancés reposent sur quelques acteurs dont STMicroelectronics.
- Une faiblesse structurelle sur la seconde étape du développement des start-ups, avec un second tour de table souvent difficile à constituer sur des fonds nationaux ou européens.

8.4 Défi du renouveau industriel et identification des priorités permettant de stimuler ce renouveau

Le renouveau industriel doit s'ancrer à la fois dans les entreprises françaises leaders dans leur domaine et dans les écosystèmes d'innovation de taille critique permettant de faire surgir

l'innovation en jouant sur la co-construction design-technologies et sur la combinaison des technologies, en maintenant une exploration multidisciplinaire en amont.

Les stimuli de ce renouveau passent par :

Technologies & conception :

- Des lignes pilotes en nanoélectronique :
 - à court terme la technologie FDSOI ayant démontré des gains de 30% en performance et en consommation au nœud 28nm et le maintien des caractéristiques jusqu'aux nœuds 14-12nm, les technologies d'intégration 3D hétérogène ;
 - à moyen terme, aux nœuds 10nm les technologies nanofils, III-V.
- Des lignes pilotes sur les technologies de différenciation comme les imageurs, les mémoires non volatiles, à court terme PCRAM, à moyen terme mémoires spintroniques, résistives, ... les technologies photoniques, les technologies RF.
- Un DesignCenter sur les technologies mûres (projet européen THINK2DO sur la technologie FDSOI dans un premier temps, à Grenoble) : l'objectif est de capitaliser sur les technologies pionnières pour développer des plateformes pouvant intégrer des fonctions numériques et analogiques, par exemples les technologies 0.3 V pour les dispositifs médicaux.
- Un DesignCenter amont sur des architectures plus exploratoires, tel que NanoDesign à Saclay, sur des architectures neuromorphiques, des architectures de circuits photoniques, de calcul quantique, de calcul adiabatique, ...
- Une recherche amont ciblée sur les voies de ruptures pour le futur de la nanoélectronique : codesign, spintronique, graphène, oxydes métalliques, ..., sur la simulation physique, électrique et des procédés, ainsi que sur le codage et la transmission de l'information pour de nouvelles architectures.
- Développement de caractérisation atomique, in operando, 3D... et modélisation multi-échelle.

Composants & systèmes :

- Programme de soutien aux composants électroniques à forte valeur ajoutée : fiabilité, sécurité, autonomie, pour les secteurs où l'Europe est compétitive aujourd'hui.
- Soutien à la recherche intégrative : conception interdisciplinaire, mixte entre procédé, conception, logiciel – co-conception – reconfigurabilité, redondance.
- Soutien aux programmes sur les systèmes complexes : ingénierie Systèmes, Test et vérification.
- Proposition de réseau de composants optiques à partir des développements d'ALCATEL et de THALES : applications critiques – défense, sécurité, avionique, solutions technologiques innovantes en FTTH – co-conception entre architecture de telecom et nouveaux composants.
- Soutien au développement de technologies innovantes de composants dédiés (amplificateurs faible bruit, forte puissance à 2 GHz, large bande GaN, circuit RF multimode multibandes, antennes directionnelles miniatures faible conso, radar on chip 77GHz, smart power, détecteurs chimiques, capteurs environnementaux, ...).
- Intégration hétérogène de l'ensemble des composants dans des nouveaux matériaux, prenant en compte de nouvelles exigences : miniaturisation, tenue à la CEM et intégrité de signal, fonctionnement à haute température, ...

Infrastructures :

Maintenir la maîtrise des infrastructures est un élément capital pour ménager des capacités de rebond par l'innovation et des capacités de développement industriel. Cela s'applique aux

- Infrastructures en nanoélectronique – soutenues dans le cadre du PIA,
- Infrastructures de calcul haute performance, de cloud computing,
- Infrastructures de nanofabrication du programme RTB-I2N.

Le renouveau industriel nécessite de s'appuyer en amont sur un système cohérent et performant de recherche. Pour cela il est impératif de soutenir la construction d'un système d'*Instituts FhG à la française*, dotés de plateformes technologiques coordonnées capables de tester de nouveaux design kits sur des technologies de rupture stabilisées, de répondre aux demandes variées de petites séries de démonstrateurs technologiques provenant des PME et TPE, et de réaliser de façon rapide et flexible le passage à l'échelle des démonstrateurs de preuves de concept issus des laboratoires amont. Les Instituts Carnot qui ont démontré leur efficacité en matière de recherche partenariale doivent s'organiser en ce sens en renforçant leur performance de valorisation et leur effet d'entraînement du système public de recherche.

8.5 Combinaison d'outils, de plateformes en soutien aux priorités du renouveau

Pour préserver et amplifier la compétitivité nationale sur les composants nanoélectroniques et nanophotoniques, et in fine permettre le développement industriel, le dispositif de recherche français doit s'appuyer sur un ensemble comprenant :

- Des clusters de dimension significative (Grenoble : nanotechnologie et Design Center, Saclay : NanoDesign et III-V, PACA : Silicium et systèmes sécurisés, mais aussi à Toulouse, Lille, Limoges, Besançon (mécanique), Bretagne (télécoms) ...), rassemblant et couplant recherche amont et recherche technologique, en lien étroit avec le tissu industriel colocalisé et l'industrie nationale. Le rapprochement des acteurs de ces sites autour de feuilles de routes communes doit être encouragé.
 - Le maintien des compétences technologiques, des infrastructures de recherche et des lignes pilotes permettant l'intégration et la validation des techniques de production pour les technologies clefs génériques, en cohérence avec la stratégie déclinée dans le pilier « leadership industriel » du PCRD européen H2020..
- Programme stratégique de soutien à la filière de nanoélectronique avec effet de levier en Europe.
 - Programme stratégique de soutien aux filières différenciantes avec effet de levier au niveau de l'Europe : filières photoniques, composants optiques (design et fabrication), composants de puissance, composants spécifiques, composants actifs et passifs (microcontrôleur, actuateur, capteurs, ...).
 - Appels à projets technologiques : la finalité en sera l'innovation technologique sous la forme d'un démonstrateur technologique : les nouveaux transistors, les nouvelles mémoires, les capteurs, ... Le croisement des disciplines technologiques doit pouvoir se justifier par les marchés qu'il adresse ou crée, le marché étant le plus court chemin pour répondre à l'ensemble des attentes sociétales.
 - Un programme de soutien aux équipements au niveau ANR, comme le propose la Cour des Comptes, « alertée par l'insuffisante attention apportée au financement de l'équipement scientifique, sujet décisif dans la compétition internationale ». Ce soutien pourrait prendre la suite du programme RTB (Résea Technologique de Base) à travers le porgramme I2N (Infrastructure Natioanle de recherche en Nanotechnologies), sur la base de la mutualisation d'équipements « mi-lourds » prenant en compte le volet design, l'ouverture aux laboratoires amont et aux PME, dans le cadre d'une stratégie nationale partagée. Leur compétitivité implique le maintien de capacités de premier plan en nanocaractérisation.

- Le développement des capacités de simulation et de design pour les matériaux et les composants du futur : cet enjeu sera porté par des équipes de taille suffisante, s'appuyant sur le maintien au meilleur niveau des capacités de calcul intensif mises à la disposition de la recherche publique et privée suivant des schémas de partage des ressources qui garantissent la confidentialité et la sécurité de l'information
- Des plateformes de conception de l'architecture des composants et des dispositifs, pour lesquelles il faudra organiser un dialogue renforcé avec les équipes expérimentales (matériaux, composants) dès les TRLs précoces.
- Un développement de l'accessibilité de l'offre technologique de la recherche publique pour les acteurs industriels disséminés sur le territoire, au travers d'actions telles que les Instituts Carnot ou le déploiement de la recherche technologique sur des sites en région.
- De façon plus large, le soutien des dispositifs qui rapproche la recherche de l'entreprise comme les laboratoires communs avec l'industrie, les chaires industrielles, les programmes Emergence de soutien à la création de start-ups, le programme Carnot.
- Accorder une priorité à la formation technologique :
 - Attirer les jeunes vers les filières technologiques par un système attractif de bourses au niveau licence, master et doctorat, et favorisant la motivation et le mérite.
 - Pratiquer l'anglais, indispensable dans le cadre des coopérations internationales.
 - Favoriser la créativité et la curiosité, moteurs d'innovation à travers les disciplines, et le travail d'équipe en mode projet indispensable dans la recherche technologique.

Ce dispositif sera complété par des partenariats internationaux ciblés, particulièrement vers l'Allemagne. A titre d'exemples, citons la coopération fructueuse avec le Fraunhofer ISE sur la photonique, avec la société Helmholtz sur le calcul intensif.

8.6 Recommandations

La focalisation des programmes phares de la stratégie nationale de recherche sur les filières d'avenir portées par les entreprises françaises et soutenues par l'Europe représente un enjeu fort de mobilisation dans le contexte actuel de compétitivité.

Pour jouer un rôle de leader au niveau européen et augmenter leur part à l'export, les filières industrielles françaises devront renforcer leur écosystème d'innovation en mobilisant davantage les plateformes de recherche intégrative sur des démonstrateurs à la pointe, en exploitant le portefeuille exceptionnel de brevets des établissements publics de recherche, en développant des designs innovants de produits sur la base des technologies pionnières maîtrisées en France, en étant proactives dans l'établissement de standards européens, en développant des lignes pilotes sur le territoire pour réaliser des prototypes d'avant-garde, et en gardant la maîtrise de la fabrication par le biais d'investissements dans les infrastructures de production et par une stabilisation des PME et start-ups dans des environnements technologiques et applicatifs porteurs de croissance.

Les acteurs de la recherche devront de leur côté mieux coordonner leur feuille de route de façon à ne pas rater le courant ascendant de l'innovation pour les technologies en rupture en réussissant le passage des preuves de concept de laboratoire (TRL1-3) aux démonstrateurs technologiques (TRL 3 - 4) et prototypes technologiques (TRL 4-7). La communauté académique doit garder un large spectre d'exploration et doit intégrer la conception très tôt dans le développement technologique, les partenariats recherche-industrie devant être favorisés.

Les plateformes technologiques de recherche doivent être soutenues de façon constante en équipements pour construire une avance décisive en recherche intégrative sur des TRL 2-3-4-5 et rendre accessibles les équipements de fabrication pour les TPE et PME. Cela repose sur des investissements d'équipements ciblés sur les verrous technologiques, mutualisés au sein de plateformes en réseau (Projet IN2, Infrastructure Nationale de recherche en Nanotechnologies). Les plateformes amont doivent permettre la réalisation de projets académiques innovants provenant des laboratoires ; les plateformes technologiques d'intégration doivent pouvoir fournir des démonstrateurs technologiques et répondre aux besoins des industriels, et en particulier la fourniture de petites séries de démonstrateurs pour les TPE et PME.

Il serait par ailleurs indispensable, dans l'évaluation des chercheurs, de mieux valoriser leurs collaborations avec les industriels et les initiatives de couplage entre les acteurs de la recherche positionnés sur des TRL différents.

Enfin, il est essentiel de renforcer la formation technologique et d'attirer plus de jeunes vers les filières industrielles, en favorisant les profils créatifs et en laissant place au mérite et au sens du collectif.

9. ALLISTENE-ALLENVI - Interactions Monde Numérique (Allistene) et Environnement (Allenvi)

Les sciences du numérique s'appuient en premier lieu sur les Sciences et Technologies de l'information et de la communication (STIC), autour de ses principales disciplines : l'informatique, l'automatique, la robotique, le traitement du signal et des images, les télécommunications et l'électronique. Mais elles interagissent naturellement avec d'autres disciplines scientifiques : les mathématiques, la modélisation ou le calcul ; la physique, dans l'élaboration des dispositifs ou les transmissions ; les sciences humaines et sociales (usages, vie privée, ...). Elles jouent un rôle central dans les avancées scientifiques de toutes les autres disciplines, notamment les sciences de l'environnement. La problématique environnementale au sens large requiert l'intégration de données et de modèles issus de disciplines différentes, ayant chacune leurs logiques et cohérences propres. Cette multiplicité des acteurs nécessite donc de pouvoir pratiquer une réelle interopérabilité (au sens de l'aptitude à coopérer) au niveau des données, des outils et même des infrastructures. Les secteurs qui impacteront monde numérique et environnement sont : le calcul haute performance permettant le passage à l'échelle, la mise en place de méthodes novatrices en modélisation, la réduction pertinente entre modèles, l'analyse multi-échelles de modèles, la conception de méthodes d'assimilation de données et leur exploitation, le développement de modèles et simulations stochastiques, le traitement au capteur indispensable pour la compréhension des phénomènes complexes en science de l'environnement. Le volume des données à traiter sera également en très forte croissance, leur diversité, leur hétérogénéité, leur non-localité, la multitude des acteurs qui les produisent et leur éventuelle confidentialité rendent indispensable la mise sur pied d'une algorithmique performante décentralisée et répartie et/ou embarquée pour être au plus proche des enjeux environnementaux. Ces secteurs sont créateurs d'emploi que ce soit dans le cœur d'activité d'Allistene, ou dans ses volets diffusants impliquant notamment les domaines d'Allenvi.

Notre civilisation est donc numérique. Les sciences et technologies de l'information et de la communication entament une nouvelle révolution industrielle et culturelle axée sur la généralisation des communications, l'évolution des usages, les capacités toujours plus grande de stockage, la nécessité du temps réel, qui se fera par la mise à disposition de composants plus puissants, la disponibilité instantanée des informations favorisant les échanges, la possibilité de modéliser et traiter les masses de données rapidement et efficacement. Cette évolution prend sa source dans les secteurs traditionnels des STIC (électronique, informatique, mathématiques, traitement du signal et des images) qui sont par excellence, l'outil de la pluridisciplinarité⁸ et le berceau de vecteurs d'innovations majeures dans des domaines très variés (santé, transports par exemple). Les Stic doivent être en pointe dans l'innovation environnementale car l'urgence environnementale et les écotechnologies est une problématique mondiale correspondant à un des axes de la stratégie nationale de la recherche et d'innovation. Elles doivent elles-mêmes veiller à limiter leurs propres impacts écologiques sur l'ensemble de leur cycle de vie. Les objectifs voulus sont nombreux et ambitieux. Comprendre, prédire, anticiper l'évolution de climats, de la biodiversité, développer les écotechnologies à faible impact environnemental, valoriser durablement les territoires. Contribuer à rendre l'environnement plus sûr en surveillant les grands cycles vitaux pour

8

Sur la distinction entre multi/pluri/inter-disciplinarité, voir Létourneau, A. (2008), « La transdisciplinarité considérée en général et en sciences de l'environnement », Vertigo, 8(2), <http://vertigo.revues.org/5253>, Tableau 2.

l'humanité (eau, climat, air) doit se faire par des nouvelles technologies d'observation et par une approche multi-pluridisciplinaire innovante entre Environnement et STIC, aussi bien au niveau de la formation (dans tous les cycles, primaire, secondaire, supérieur) qu'au niveau de la recherche et du développement technologique. Les acteurs de demain ne sont pas suffisamment formés à cette pluridisciplinarité. Des thèmes doivent émerger plus radicalement tels que la surveillance de l'eau, de l'air dans l'environnement, la définition d'indicateurs calculables utilisables et imposés par les décrets (par exemple en termes de perméabilité des sols, d'impact acoustique sous marins notamment, d'efficacité énergétique, de respect de la biodiversité), les développements de capteurs innovants, l'optimisation des réseaux de capteurs, les technologies de l'information et de la communication pour le diagnostic et le monitoring (électronique, modélisation, traitement du signal), la modélisation et l'évaluation des cycles vitaux, le management, l'aide à la décision, le stockage et l'exploitation par diverses communautés des masses de données.

Enjeux et verrous. Le premier verrou rencontré dans la pratique des études environnementales est l'accès et la qualification des données. Le traitement de ces masses de données pose des challenges considérables. Les flux et masses de données sont hétérogènes, reflétant la diversité des capteurs, des méthodes d'acquisition et d'échantillonnage, de codage et de représentation et aussi simplement de la diversité des disciplines impliquées. Les données sont complexes, souvent associées à de multiples modalités de mesures physiques correspondant à différentes échelles de temps et/ou de résolution spatiale impliquant de très fortes interactions, des non linéarités et autres complexités des systèmes étudiés.

De ce fait, ces données recouvrent un très large ensemble de disciplines intégrées (sciences de la terre, des enveloppes et de l'environnement, chimie, biogéochimie, physico-chimie des matériaux, écologie, sciences agronomiques, sciences humaines et sociales, génétique, génomique et bio-informatique, mathématiques appliquées,) et de moyens pour les mettre en œuvre (observation, surveillance et mémoire de l'environnement, expérimentations à différentes échelles, traitement, modélisation et simulation numérique). Dès lors, un défi important est d'une part, la gestion et l'assimilation d'une masse importante de données pour les valoriser dans des modélisations adaptées aux objectifs, impliquant l'étude de phénomènes et d'interactions variés (souvent couplés) sur des échelles d'espace contrastées (du microscopique au pluri-kilométrique) et avec des constantes de temps multiples (de l'heure jusqu'à la centaine de milliers d'années).

La prise en compte des enjeux de *privacy* et d'écoconception sera déterminante dans le succès des solutions proposées, notamment dans la perspective du renforcement d'un secteur d'écoTIC en France (« green IT »). Un autre enjeu croissant lié aux open data et aux données issues du crowd sourcing est celui de la qualité et de la confiance attachées à une information en fonction de sa généalogie (quelle autorité l'a produite, ou encore quelles sont les données brutes et les traitements subis). La notion d'observatoire citoyen devient centrale dans la notion de monitoring de l'environnement. La capacité à exploiter à la fois les données « autoritative » et les données de « crowdsourcing » constitue un enjeu important. La présentation d'information aux décideurs et aux citoyens pour faciliter leur sensibilisation à ces enjeux, des changements de comportements des sociétés, comporte également des enjeux en termes par exemple de synthèse et de visualisation innovante (comme la réalité augmentée), enjeux qui impactent fortement Allistène et Allenvi.

9.1 Inventaires des forces et des faiblesses

Devant le challenge de raisonner de manière de plus en plus intégrée (temps, espace, phénomènes, disciplines), la structuration de la recherche ne doit plus être seulement thématique mais doit introduire un aspect transversal pour mutualiser d'une part l'acquisition, la gestion des données, la physique des processus mesurés et, d'autre part, les moyens d'analyse, de traitement, de modélisation et de simulations (du modèle de comportement jusqu'à l'outil). Un exemple récent concerne la centralisation des moyens de calcul décidée par les pouvoirs publics en 2007, aujourd'hui fédérée par le GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif, labellisée TGIR par le MESR) ou le développement et connaissance de toutes les composantes des modèles de climat, dont certaines largement diffusées (Nemo, OASIS) mais qui peuvent n'être spécifiques qu'à une seule communauté et qui gagneraient à être diffusées plus largement sur les autres thématiques scientifiques. En modélisation, en simulation numérique pour l'environnement par exemple, les équipes de recherche française sont d'un très bon niveau et leurs modèles numériques sont très reconnus et diffusés. Souvent associés à des équipes spécialisées en mathématiques appliquées apportant des contributions remarquées en analyse numérique, en exploitation conjointe des modèles et des observations, ou en statistiques, elles font souvent partie des meilleures équipes internationales. Malgré tout il existe un manque de simulations couplées entre les différents compartiments environnementaux et agro-écologiques (air, eau, sol, végétation, faune, activités humaines) et les différentes échelles (local, ville, région, pays, continent, planète). L'évaluation de ces modèles, l'identification de leurs principales faiblesses sont insuffisantes et les études de sensibilité et d'incertitude manquent pour mieux orienter les évolutions des systèmes et/ou des systèmes de systèmes. Le couplage avec des modèles de santé ou économiques est aujourd'hui également limité, et gagnerait à se développer afin de favoriser l'exploitation des simulations pour l'aide à la décision au niveau politique et pour l'information du grand public.

Même si notre système d'enseignement et de recherche est performant, dans les domaines du numérique et de l'environnement (avec des laboratoires et des structures d'enseignements excellentes), les étudiants n'ont souvent pas de double compétence (Environnement-Physique ou Ecologie-Biologie et Calcul scientifique – Informatique-Modélisation). L'intégration des enjeux écologiques et des méthodes d'analyse et d'éco-conception est encore peu présente dans les cursus d'enseignement et de recherche et pourtant on sent une demande et une poussée forte des étudiants sur cette double compétence qui devient de plus en plus attractive. Un obstacle à cette demande est que souvent nous manquons de personnel ayant cette double compétence et qu'il est souvent difficile dans nos organismes de valoriser des carrières dans le cadre de recherches de type pluridisciplinaires qui ne sont pas aux cœurs des sections CNRS et/ou MESR. Pour faciliter le partage et la publication des données, une politique incitative à destination des chercheurs de type « data citation » pourrait être efficace. La participation active du monde de la recherche à la démarche de développements des standards d'interopérabilité (par exemple OGC) qui jouent un rôle majeur dans la construction des équipes et des réseaux au niveau international devrait également être encouragée.

Les domaines précités sont globalement moins développés en France que dans certains autres pays, notamment en Amérique du Nord, Europe du Nord où l'on trouve des instituts intégrant parfaitement les aspects environnementaux et technologiques. On trouve ainsi proportionnellement moins d'équipes de recherche spécialisées dans ces thèmes en France, et celles-ci sont souvent de petite taille. De façon similaire, on trouve peu d'acteurs industriels français dont c'est l'activité principale malgré quelques succès industriels dans le domaine du monitoring de l'environnement (CLS, MAGELLAN, ITRON par exemple)

Les recherches en environnement devant répondre aux grands défis sociétaux et aux enjeux technologiques afférents, se fondant en particulier sur l'observation, l'expérimentation et la modélisation des phénomènes complexes à étudier génère une production massive de données souvent sous-exploitées et/ou difficiles à interpréter. L'hétérogénéité spatiale et temporelle des systèmes à étudier ainsi que leurs degrés d'interaction amènent souvent les équipes de recherche à les caractériser et modéliser de façon découplée. L'exploitation exhaustive des travaux R&D sur le développement numérique de méthodes et d'outils de simulation pour l'environnement est aujourd'hui dispersée et pas toujours accessible, chaque laboratoire ou Institut ayant mené le développement et l'enrichissement numériques de ses propres logiciels (version prototype et en fonction de ses applications métier). Par ailleurs, les acteurs opérationnels, et parfois les organismes de recherche, ont parfois des difficultés d'accès aux données environnementales, pourtant existantes et collectées ou générées par des organismes publics (CNRS, Instituts etc). La directive européenne INSPIRE qui demande aux états de membres de mettre en ligne les données localisées produites par l'administration afin d'aider à la définition de politiques environnementales communautaires et d'aider à la communication vers les citoyens est une opportunité car elle a ainsi conduit à la mise en place d'infrastructures de données localisées documentées comme le géoportail en France. Sur certaines thématiques très transverses, des synergies de nature très diverses seraient également possibles de manière à capitaliser et mutualiser les efforts de R&D en numérique (mise en commun, couplages de codes, outils en haute performance, etc...). L'économie de moyens pourrait ainsi être considérable. Par ailleurs, il faut noter que les problématiques environnementales impliquent de plus en plus une dimension continentale ou globale pour laquelle les équipes françaises doivent pouvoir jouer un rôle d'acteur mais également si possible d'animateur.

9.2 Analyse des grandes tendances, grandes évolutions

La prise en compte de l'environnement et du développement durable dans l'élaboration puis la mise en œuvre de nouvelles technologies ou méthodologies a un impact fort sur les thématiques et l'organisation de la recherche. Depuis quelques années, le rapprochement et l'interaction de nombreuses disciplines améliorent très significativement la compréhension des processus bio-physico-chimiques par exemples. Ces analyses pluridisciplinaires multi-échelles et multicritères deviennent d'autant plus complexes que le couplage fonctionnel entre les différentes enveloppes de la Planète (géosphère, hydrosphère, atmosphère biosphère) est indispensable à la compréhension du fonctionnement des enveloppes superficielles de la Terre. Elle nécessite la mise en œuvre à la fois de méthodes expérimentales, numériques, déterministes et probabilistes et les moyens à mettre en œuvre peuvent croître de manière exponentielle. La simulation numérique devient un outil incontournable, parfois réglementaire, dans de nombreux secteurs de l'environnement: l'eau (océanographie, hydrologie), l'air (météorologique, pollution), la dynamique des agroécosystèmes (biodiversité, agriculture) et des systèmes sociaux (villes, transports, ...). L'évolution vers un couplage de modèles environnementaux à différentes échelles spatiales et temporelles accroît encore la pluridisciplinarité mise en jeu dans les applications. Cette tendance s'accompagne d'une meilleure représentation de nombreux processus physiques, ou chimiques, biologiques ou sociaux. Parallèlement on constate une augmentation des ressources de calcul utilisées pour les simulations qui requièrent de grandes masses de données, parfois très incertaines à la résolution du modèle. Afin de réduire les incertitudes des simulations, on recourt de plus en plus à l'assimilation de données, c'est-à-dire au couplage des modèles numériques avec les données d'observation. L'assimilation de données commence à être déclinée dans de nombreux domaines, où les acteurs opérationnels sont très demandeurs. L'assimilation de

données devrait d'autant plus se développer qu'on note une évolution des moyens de mesure. La Terre est sous surveillance avec des satellites de plus en plus performants et des capteurs de plus en plus nombreux et divers. La métrologie, le traitement du signal et des images font des progrès importants qui vont s'accroître. Des capteurs de plus en plus petits et de moins en moins coûteux pourront être déployés en nombre. Ces capteurs, connectés en réseaux et parfois mobiles, seront un élément essentiel des systèmes de simulation, y compris pour la prévision.

Concernant les données, on constate une évolution de leur diffusion, visualisation et valorisation. Des données collectées par des citoyens commencent à être partagées dans le grand public. Google met aujourd'hui à disposition des quantités gigantesques de données satellite dans son « Earth Engine », et la concurrence européenne ne semble pas organisée dans ce domaine. ». Pour ce qui est de l'Europe, la directive INSPIRE précédemment citée n'est pas suffisamment connue d'utilisateurs potentiels.

Les progrès réalisés au cours de la dernière décennie, tant dans les performances des systèmes informatiques et d'acquisition que sur la diversité des supports, ont fortement contribué à la production massive de données expérimentales et numériques confrontant les chercheurs à un problème d'analyse et de gestion de ces données, afin d'améliorer la connaissance du système. Pour pallier ce problème, de nouvelles méthodologies émergent comme la fouille de données. Les objectifs d'une stratégie complète d'analyse et de traitement de données permettront à terme de faciliter leur mise à jour, leur validation, leur intercomparaison, et le développement des méthodologies de surveillance. Au niveau international une initiative intergouvernementale comme GEO/GEOSS (qui vise à développer un système global d'observation de la terre basé sur un système de systèmes nationaux ou par disciplines) a un effet très structurant sur les communautés de chercheurs dans le monde de l'environnement, et permet notamment de faciliter l'accès à des masses considérables de données spatiales ou in situ.

Parallèlement dans le contexte de mise en places de directives internationales notamment européennes, (type Directive Cadre Eau, Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin ou Directive Cadre Déchets qui demandent une implication dans des processus d'expertise adossés à des recherches fondamentales) de la montée en puissance de questionnements de la société civile et des collectivités sur l'état écologique, la restauration et l'ingénierie écologique associée, la nécessité de disposer d'indicateurs forgés sur des bases scientifiques robustes est cruciale et pour cela il est nécessaire et urgent d'avoir une recherche pluridisciplinaire amont, expérimental autant que théorique passant par la mise en place d'installations d'acquisition de traitement et d'analyse pérennes.

La compréhension de phénomènes environnementaux induit la prise en compte de systèmes à plusieurs échelles spatiales et temporelles dans les analyses de données et dans les simulations. Leurs résolutions nécessitent l'utilisation d'algorithmes (mathématiques, informatiques, traitements des signaux et des images) et des moyens de visualisation très performants. Aujourd'hui les organismes et instituts de recherche spécialisés dans cette thématique sont très actifs dans le développement d'approches multi-échelles en prenant en compte l'aspect physique et l'environnement informatique (calcul haute performance). Le recours au calcul parallèle intensif, sur la base de méthodes numériques performantes, robustes et précises, incluant de forts couplages multi-physiques sur des échelles spatiale et temporelle contrastées, doit être systématisé. Par ailleurs, la caractérisation des processus physiques et des incertitudes (lien avec les observations, en distinguant les composantes épistémique et stochastique), et leur propagation dans les modèles, doivent être menées de manière optimale (méthodologie, analyse de sensibilité), afin d'identifier les paramètres et modèles pertinents d'un système, et d'augmenter *in fine*, la compréhension d'un système.

Outre les contenus, deux autres évolutions promettent d'amplifier le déluge de données auquel nous sommes soumis et donc les outils nécessaires de filtrage et de gestion permettant d'y faire face. D'une part, les données massives produites quotidiennement sont de plus en plus disponibles en ligne, notamment grâce au mouvement des données ouvertes (Open Data). Les recherches permettant une exploitation optimale de ces données associées aux bases de données traditionnelles dans un contexte de linked data (web sémantique) est nécessaire. D'autre part, l'Internet des Objets promet d'associer une identité informatique à des quantités d'objets physiques et de parsemer le monde physique de réseaux de capteurs de plus en plus variés. Cette multiplication massive des points de collecte de l'information engendre des flots de données tels que de nouvelles stratégies d'archivage, d'acquisition et d'analyses sont nécessaires afin de réduire les flux dès le capteur. Les capteurs doivent devenir plus intelligents et embarquer des traitements de l'information permettant de ne transmettre que les seules données nécessaires à l'utilisation finale (acquisition compressée, codage distribué, ...) Ces sources d'information nouvelles vont permettre de créer des outils d'analyse, d'agrégation, de fouille et de visualisation interactive de données aux possibilités infinies. On peut anticiper de nouveaux marchés stratégiques et de nouvelles applications emblématiques, comme les applications de guidage GPS rendues possibles par les bases de données cartographiques et/ou l'utilisation à toutes échelles des données satellitaires, le marché de l'énergie au sens large (ressources fossiles, ressources marines, nouvel énergie, smart-grids etc). De plus, il sera possible dans le futur d'insérer facilement des systèmes électroniques dans les objets. Cela conduira à développer des objets nouveaux et modifiera de manière radicale la manière de concevoir, produire, distribuer, utiliser et recycler les objets actuels et futurs.

9.3 Propositions d'avancées significatives directement valorisables et génératrices d'emplois

Dans l'enjeu de l'alliance Allenvi qui est de « comprendre le fonctionnement et les interactions à différentes échelles spatiales et temporelles des systèmes climatiques, écologiques et sociologiques », la simulation numérique représente ainsi un moyen/outil privilégié pour accéder aux niveaux pertinents de la compréhension très fine du fonctionnement d'un système, à des échelles de temps et d'espace qui ne sont pas forcément accessibles par la mesure et l'observation.

Le développement de nouveaux capteurs combinant une partie matérielle et une partie logicielle permettrait de capitaliser les travaux de nos équipes de recherche, notamment dans le domaine des réseaux de capteurs, de la vision par ordinateur et des interfaces tactiles et haptiques.

La fusion de données a pour objectif de permettre une description d'ensemble d'un système à partir des mesures acquises par le nombre sans cesse croissant des capteurs dans les nombreux milieux du système et constitue un outil précieux d'aide à la décision concernant le contrôle du fonctionnement d'une installation industrielle et, *de facto*, l'anticipation des risques environnementaux, naturels ou anthropiques. A cette fin, différents axes de R&D doivent étudier plusieurs approches possibles, et permettre ensuite d'identifier et de construire les bases de futurs systèmes experts et d'aide à la décision, afin de détecter efficacement les situations d'intérêt et de repérer les éventuelles anomalies au regard du comportement attendu ou précédemment observé.

Outre le partage des données intrinsèques liées aux systèmes, les travaux de R&D sur la fusion de données environnementales, pourraient être ainsi mutualisés pour différents champs d'application (études d'impact d'une installation, météorologie, océanographie, climatologie, biodiversité...). L'ensemble de cette approche pourrait être valorisée par des

intercomparaisons et mises en commun avec différentes communautés de recherche en environnement.

Les travaux autour de la quantification des incertitudes doivent être encouragés et soutenus. Ils permettent d'identifier les sources d'incertitude et de concentrer les efforts de modélisation ou d'observation sur ces sources. En particulier, dans le cadre du couplage entre modèles, il est important d'analyser la propagation des incertitudes dans le système de modélisation. La quantification d'incertitude est cruciale dans l'analyse des risques. Des avancées dans le domaine de l'estimation des risques sont nécessaires. En environnement, la plupart des problèmes modélisés sont associés à des risques qu'il faut mieux prédire, comprendre et éventuellement contrôler. Il faut veiller à proposer une quantification des risques exploitable par les décideurs politiques. Ceci passe par le couplage avec modèles de santé ou d'impact économique. Le secteur privé peut aussi valoriser ce type de résultat, par exemple pour la gestion de l'énergie, pour la pollution industrielle ou accidentelle, dans les assurances, ou dans la réassurance lorsqu'il s'agit de risques extrêmes.

Une avancée remarquable concernerait une modélisation systémique, prenant en compte les relations entre les acteurs environnementaux, économiques et sociaux. Il convient de soutenir la création d'outils d'aide à la décision, fondés sur des analyses de risques et permettant d'optimiser la gouvernance locale des politiques publiques environnementales.

Les efforts de R&D en numérique pour l'environnement pourrait être capitalisés au travers d'outils de calculs ou de plate-forme communautaires multidisciplinaires et pluri-organismes, environnement commun dans lesquels seraient intégrés des outils de nature différente et l'« up-to-date » des développements numériques (maillages, bibliothèque de solveurs, codes de calcul et d'analyse, outils de visualisation, de gestion de données, ...). Cette structure, dédiée à des applications transverses (couplages d'écosystèmes, transfert atmosphériques par exemple, ...) permettrait ainsi la mise en œuvre de simulations numériques, en offrant une unique interface pour piloter l'ensemble des codes numériques intégrés, un couplage de logiciels de simulation pour améliorer la représentation multi-physique des systèmes et les besoins de couplages afférents, et une inter-comparaison des codes.

Pour aider au développement de la recherche et des débouchés industriels, il est important d'améliorer l'accès aux données. De nombreuses données détenues par des organismes publics ne peuvent pas être exploitées par des tiers, ce qui obère la valorisation des données, parfois chèrement collectées ou simulées. La recherche s'en trouve limitée, et les industriels ne peuvent construire des produits avancés qui pourraient ensuite être exportés. Il faut donc encourager l'ouverture des données, en offrant des accès à distance dans des formats ouverts. Cela suppose également le changement de modèles économiques des acteurs des domaines pour mieux prendre en compte la valeur d'une information numérique et permettre la rémunération des intervenants nécessaires.

De même, il faut encourager les initiatives permettant un accès plus direct aux modèles environnementaux. Aujourd'hui, les modèles numériques français sont souvent des logiciels libres, mais leur utilisation nécessite des connaissances très avancées. Il est pourtant possible de simplifier l'accès à ces modèles, ce qui aurait plusieurs conséquences positives : une collaboration plus aisée entre différents domaines, une appropriation des modèles plus grande dans l'industrie, la création de nouveaux usages intégrant ces modèles. Des réflexions sur la mise à disposition, et en particulier la visualisation, des résultats de calcul doivent être menées.

Enfin, en améliorant leur réparabilité, l'éco-conception des TIC permettra également de créer des nouveaux emplois qui contribueront à étendre la durée de vie de ces technologies.

9.4 Propositions d'avancée avec prise en compte du défi du renouveau industriel et identification des priorités permettant de stimuler ce renouveau

Comme indiqué au début de cette section, une raison de notre faiblesse dans les domaines considérés est le manque d'interdisciplinarité. La première action pour stimuler à moyen terme le renouveau industriel est donc de développer les liens entre Allistene (informatique, électronique embarquée, traitement du signal et de l'image, sciences humaines et sociales) et Allenvi (agro-écologie, aménagement des territoires, sciences de la Terre, de la mer ou du climat, biologie, écologie, physico-chimie, sciences économiques et sociales...) en créant des équipes réellement interdisciplinaires, à tous les niveaux : dans les laboratoires de recherche, dans des structures telles que les IRTs ou les laboratoires communs recherche-industrie, et dans les centres de R&D industrielle. Cet effort doit impliquer non seulement les acteurs de la chaîne de l'innovation, notamment les pôles de compétitivité, mais aussi les acteurs de la recherche académique et de l'enseignement supérieur. La création de filières d'enseignement spécifiques doit notamment faire partie intégrante de cet effort. Par ailleurs, la recherche dans le domaine de l'environnement doit se situer dans un contexte résolument international, et les Unités Mixtes de Recherche Internationales (UMRI) constituent un cadre privilégié pour associer des équipes de recherche de haut niveau, des pays du Nord en Europe et des pays du Sud sur des thématiques pluridisciplinaires. Ces laboratoires internationaux encore peu nombreux, (UMMISCO, LIRIMA), devraient permettre de mutualiser et de coordonner les efforts en matière de recherche de différents Instituts Français et Européens avec les partenaires d'excellence du Sud en permettant des économies substantielles et en évitant la multiplication d'initiatives souvent redondantes et concurrentes. Ces laboratoires devraient être fondamentalement pluridisciplinaires à travers les alliances Allistène et Allenvi.

La valorisation des technologies et méthodologies issues de la recherche peut se faire soit directement par la mise en place d'un lien entre les industriels et les organismes et instituts de recherche soit, par la création d'entités dédiées, comme des Start-ups. Dans ce but, il est nécessaire de structurer les recherches dès l'amont avec les industriels en promouvant des collaborations étroites et sur le long terme. Ces liens existent déjà pour certains organismes de recherche mais sont souvent bilatéraux. Pour stimuler un renouveau industriel, il faudrait réorganiser les liens industrie-recherche et surtout les rendre accessibles aux PME. La création de Start-ups ou de filiales permettrait ainsi de valoriser les résultats des activités de Recherche, et d'assurer une meilleure articulation et adéquation entre les programmes de recherche et les besoins industriels.

Dans le domaine de l'environnement, le renouveau industriel pourrait être stimulé par la mise à disposition de nouveaux outils d'analyse et d'aide à la décision, et par la création de nouveaux services autour des activités environnementales. Un secteur d'activité important se constitue autour de la gestion des villes. On évoque parfois la « ville intelligente » pour se référer à la surveillance, la prévision à court terme et la planification à l'échelle urbaine. Cet enjeu est très lié aux sciences du numérique (réseaux communicants et sociaux), aux sciences de l'environnement (mesure en milieu urbain, modélisation) et à d'autres aspects comme la mobilité ou l'urbanisme. Le développement des nouveaux services devra s'accompagner d'outils d'interaction permettant la fourniture de données, en particulier par les citoyens.

10. ALLISTENE-ANCRE - Numérique (Allistene) et Energie (Ancre)

10.1 Contexte, Domaine d'interface TIC / Energie et enjeux de recherche associés

Les TIC sont acteurs à plusieurs titres sur les enjeux énergétiques :

Les TIC : consommateurs d'énergie

Le déploiement massif dans la vie du citoyen et son activité quotidienne de travail, des applications et outils de communication du monde numérique entraîne une croissance très rapide de la consommation énergétique associée. Déjà, les TICs représentent de 8 à 10% de la consommation électrique en Europe². Des projections prévoient une consommation énergétique mondiale de 14% pour les TICs vers 2020³ Il est donc essentiel d'innover pour maîtriser voire stopper cette tendance énergivore des TICs en soutenant le développement de technologies permettant de réduire la consommation des circuits microélectroniques entrant dans la composition entre autres des différentes générations de réseaux de communications, des centres de calcul ou des mobiles.

Plusieurs aspects sont à prendre en compte :

- Les fermes de serveurs et les gros calculateurs sont aujourd'hui les lieux centralisés et donc facilement identifiables de cette consommation. Des efforts conséquents sont faits et qui doivent se poursuivre, y compris en termes de R&D pour réduire leur consommation. Cela passe par une approche intégrée allant du bâtiment et de son optimisation énergétique (source renouvelable, récupération et valorisation de la chaleur,...) jusqu'aux choix des composants électroniques et processeurs, en passant par l'architecture matérielle et logicielle des serveurs et de leurs applications.
- Il convient également d'évoquer l'énergie nécessaire aux systèmes nomades communicants (tablettes, smartphones, etc... mais aussi capteurs) de plus en plus performants (3G à 4G, puis 5G...) mais très consommateurs d'énergie et dont il serait souhaitable qu'ils deviennent quasiment autonomes.

Avec l'internet des objets, le transport et le stockage de l'énergie devront servir des besoins fortement distribués. Les enjeux de recherche sont d'autant plus importants que l'innovation au niveau de l'objet communicant est particulièrement contrainte en termes de miniaturisation / intégration et en termes de coût.

Cette recherche doit se décliner au moins à trois niveaux :

- Elle relève largement des composants μ -électronique avec une recherche sur des architectures de processeurs innovantes, intrinsèquement moins énergivores pour certaines applications (par exemple les architectures hybrides CMOS-spintronique ou les architectures neuromorphiques),
- La recherche s'organise également au niveau des architectures de systèmes : les systèmes d'instrumentation et de surveillance de trafic et de charges de travail permettent d'identifier les ressources sous-utilisées, puis de là d'agir pour réduire l'empreinte énergétique du système de façon globale. Au niveau des logiciels, des analyses statiques ou dynamiques peuvent potentiellement permettre de construire des profils énergétiques de programmes qui seront déterminant pour mieux gérer la

consommation énergétique du programme lors de son exécution. Ces économies potentielles viennent en complément des recherches faites au niveau du matériel.

- la recherche doit aussi prendre en compte le développement de systèmes permettant la récupération d'énergie (thermoélectricité, photovoltaïque...) en couplage avec un stockage d'énergie performant, les TICs intervenant dans la définition, l'optimisation et le contrôle-commande optimisée de l'énergie.

Par ailleurs **l'usage des TICs** est souvent associé à des **économies de ressource** (papier, matériaux pour les CD par exemple) et d'énergie, avec par exemple le développement d'une économie électronique : l'e-gouvernement (paiement électronique des taxes), l'e-santé, l'e-banque, l'e-commerce, l'e-travail, ou encore avec l'évitement de transports par la diffusion de technologies de type audio-visio- conférences.

L'évaluation de ces gains nécessite un effort de recherche important, à l'interface entre sciences économiques, énergétique et numérique, ainsi que le développement de modèles plus sophistiqués d'analyse de cycle de vie (cad prenant en compte davantage de critères et paramètres). Les TICs et en particulier les réseaux de capteurs seront incontournables pour disposer des informations nécessaires pour appréhender correctement une problématique énergétique extrêmement complexe aux nombreux tenants et aboutissants imbriqués.

Les TIC : composante essentielle des technologies pour l'efficacité énergétique, ceci dans des secteurs aussi divers que la production d'énergie, les réseaux, le bâtiment ou les transports, ainsi que l'industrie. Les TIC vont jouer un rôle fondamental dans le paysage énergétique du futur, à tous les niveaux : de la production avec l'insertion d'énergies renouvelables, à la distribution et à la consommation qui feront notamment appel à des algorithmes de contrôle-commande, du traitement de données massives, de l'apprentissage.

- *Dans le domaine de la production d'énergie* et notamment pour les énergies renouvelables et intermittentes –souvent couplées à des services de stockage- la prédiction du productible est un élément clé de l'économie des systèmes productifs. Les progrès en matière de précision de cette prédiction reposent - outre la connaissance du fonctionnement du système productif - sur le développement de codes de modélisation, d'apprentissage, et sur le traitement de données. En recherche, ces enjeux renvoient au nécessaire soutien à la modélisation des systèmes complexes, multi-physique et au calcul intensif, ainsi qu'à une approche technico-économique.

Les sources d'énergies renouvelables sont souvent réparties sur un vaste territoire, en grand nombre, voire distantes (éolien offshore) des réseaux de distribution. Il y a donc un vrai besoin des TIC et notamment des technologies numériques pour le contrôle de points multiples (qui de plus ne produisent pas tous en même temps), la surveillance à distance et le diagnostic de panne, les défauts de connexion filaire, la maintenance prédictive.

Plusieurs verrous doivent ainsi être dépassés : fiabilité à l'échelle des composants (par exemple tenue des isolants aux fronts raides imposés par les convertisseurs de puissance exploitant les dernières générations de semi-conducteurs à grands gaps) ; conception d'ensembles capables de fonctionner longtemps en mode dégradé et de systèmes de contrôle reconfigurables pour s'adapter aux défaillances.

En plus des améliorations dans la construction et la configuration de ces équipements de production (approche système, optimisation des rendements, récupération de chaleur), les TIC et notamment l'Automatique, joueront un rôle majeur dans l'économie d'énergie. À titre d'exemple on peut citer le raffinage du pétrole brut par l'exploitation automatique avec rétroaction continue des colonnes de distillation et l'incorporation de colonnes à parois de séparation ; ce type d'approche pourrait s'appliquer aussi aux bioprocédés, bio-raffinerie, etc..

- ***Les réseaux d'énergie de demain seront plus complexes et devront donc être plus « intelligents ».***

Tous les vecteurs d'énergie et leurs réseaux associés sont impactés par les énergies renouvelables, qui sont le plus souvent intermittentes (mais prévisibles) et très disséminées : c'est le cas pour le réseau électrique qui accueille du solaire PV (ou thermodynamique) et de l'éolien, le réseau de gaz qui doit admettre des biogaz, voire de l'hydrogène ou du méthane issu de biomasse, et les réseaux de chaleur avec le solaire thermique, la co-génération, voire la récupération d'énergie basse température issue de sources diverses. Le nombre d'acteurs sur ces réseaux et en particulier le nombre de producteurs ne cesse de croître. Pour pallier l'intermittence et éviter les surdimensionnements, les réseaux électriques et de chaleur sont amenés à s'intéresser au stockage, tant massif que délocalisé, ainsi qu'à la maîtrise de la puissance consommée (effacement). Le réseau électrique verra également un nouvel usage croître avec les véhicules électriques et hybrides. Enfin une vision globale de l'énergie amène à moyen-long terme - à envisager des transferts d'énergie d'un réseau à l'autre (transformation d'électricité en hydrogène ou méthane par exemple), sans oublier la dimension continentale des échanges d'énergie (gaz, électricité). Les réseaux sont donc un système complexe, dynamique dont le niveau de complexité est en train de changer d'échelle.

Chacun de ces réseaux va donc devoir évoluer vers plus de flexibilité, d'interopérabilité, et plus d'interactions avec les millions de différents acteurs, qu'ils soient producteurs, stockeurs, agrégateurs, consommateurs d'énergie afin d'optimiser -le plus souvent en temps réel- l'adaptation offre-demande, et ce à des échelles allant du très local (le bâtiment, le quartier, micro-smartgrids ou cellules locales), jusqu'au continent. Ces évolutions impliquent une recherche dynamique :

- sur le développement de capteurs (pour partie autonomes) et des composants permettant le suivi des réseaux, ainsi que pour le développement de composants pour l'électronique de puissance ainsi que pour les réseaux DC et HVDC qui se développent pour transporter avec le minimum de pertes l'énergie électrique sur de grandes distances ou pour relier les éoliennes offshore au continent.
- Sur le suivi en temps réel des productions, stockages, consommations, ce qui implique des capteurs et du traitement massif de données, du contrôle-commande et des automatismes de grande fiabilité, de la sûreté/vérification des logiciels,
- Sur le couplage de problématiques associant technique et société, comme celle de la cybersécurité avec le risque spécifique d'attaque destructrice du réseau électrique (détection d'attaques, protection, cryptage de données sensibles, ...) ou encore celles liées au respect de la vie privée (cf § 1.6)
- En modélisation multi-agents des réseaux d'énergie (électricité, gaz, eau chaude) pour prendre en compte leurs complexités : couplages entre eux et avec les réseaux de communication, contraintes économiques, contraintes de temps réel (adaptation offre/demande) et de répartition géographique (production et consommation, de l'échelle locale à l'échelle du continent). Pour le développement des stockages avec des algorithmes de gestion dédiés et optimisés pour en assurer la durée de vie, voire la sûreté, les rendements optimaux (par exemple Battery Management Systems) et pour les multiples services que le stockage peut apporter au réseau (soutien puissance, tension, fréquence,...). Ces algorithmes s'appuieront sur les modèles physiques des stockages.

- Développement de micro-smartgrids, à l'échelle du bâtiment, du quartier, d'une ville avec les couplages production (dont ENR), stockage local, agrégation et maîtrise de la demande ; Les TIC apporteront le contrôle-commande, les automatismes de gestion et les tableaux de bord nécessaires aux acteurs gestionnaires locaux.

Ces nouvelles frontières numériques posent des questions nouvelles en matière de répartition de l'intelligence ou du calcul, de remontée des données afin de pouvoir résoudre des questions de latence et pouvoir préparer des réponses dans des délais acceptables à tout afflux de demande.

- **Des secteurs comme celui du bâtiment**, (résidentiel ou tertiaire), qui, à lui seul, représente la moitié de la facture énergétique globale de l'Union Européenne, bénéficieront de l'usage des TICs (capteurs et métrologie adaptée, contrôle-commande amélioré et communicant, maquette numérique, apprentissage des modes de vie,...) pour réduire leur empreinte énergétique. La Commission Européenne estime ainsi que la consommation énergétique des bâtiments résidentiels pourrait ainsi être réduite d'au moins 35% d'ici 2020. L'implication de l'utilisateur dans la gestion de sa consommation énergétique est un élément clé. Il ne devra en particulier plus être passif mais pro-actif (cf §1.6) : on passe du rôle de consommateur à celui de « consom-acteur ».

L'implication des usagers nécessite dans un premier temps de leur permettre de visualiser leur consommation énergétique (making energy visible). Cette visualisation devra offrir une représentation adaptée permettant aux utilisateurs de prendre conscience de l'impact économique et écologique de leur mode de vie au sein de leur environnement domestique ou professionnel. Elle devra les inciter à adapter leur comportement (interfaces miroirs, persuasives) tout en les guidant dans cette adaptation par la mise en place de conseillers énergétiques. Une étude réalisée par Accenture⁹ en 2010 dans 17 pays différents a entre autre montré que les usagers surestiment leur propre compréhension sur la façon d'optimiser leur consommation. Le rôle de ces conseillers énergétiques sera de traduire des contraintes complexes sous une forme appréhendable, permettant aux usagers de prendre des décisions éclairées. Ces contraintes sont liées à l'activité des occupants, aux caractéristiques des bâtiments mais également, dans le cadre des smart grids, aux signaux envoyés par les exploitants comme une demande de réduction de consommation, une variation des tarifs sur 24h etc... La mise en place de ces conseillers énergétiques repose sur l'installation de capteurs (consommation, mesures environnementales etc) basse consommation et communicants. Ces technologies existent mais un effort important sur l'interopérabilité et l'auto configuration (plug and play) est à réaliser afin de faciliter un déploiement important de ces capteurs, pré-requis pour la mise en œuvre des conseillers.

La recherche à conduire est non seulement celle sur les dispositifs technologiques, mais aussi celle sur les usages (en associant les sciences humaines et sociales comme précisé au § 1.6 de ce document). Elle implique certainement la réalisation de démonstrateurs allant jusqu'à l'habitat à l'échelle 1 et aux expérimentations en situation réelle chez des usagers volontaires. Un autre domaine de la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment pour lequel les constructeurs et énergéticiens ont besoin des technologies numériques est le développement de maquettes numériques prenant en compte toutes les contraintes du bâtiment : environnement (ensoleillement, localisation, ressources énergétiques...), usages, économie, énergie, cycle de

9

http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Understanding_Consumer_Preferences_Energy_Efficiency_10-0229_Mar_11.pdf

vie, etc... Maquettes numériques qui soient à la fois des outils pour la conception, mais aussi pour les gestionnaires du bâtiment.

Ces développements menés pour le bâtiment avec l'appui des technologies numériques sont à étendre –de façon complémentaire et cohérente – aux quartiers afin par exemple d'optimiser les énergies produites et consommées à l'échelle d'un quartier, ou encore de comprendre, de gérer, voire d'anticiper les interactions entre une ville en tant qu'ossature matérielle figée (bâtiments, réseaux d'énergie et d'eau, systèmes de transport, etc.) et ses habitants et leurs comportements.

- *De la même manière la **maîtrise de l'énergie dans les transports** et plus généralement la mobilité passera par le développement de plus d'intelligence, et ce aussi bien pour le transport de personnes que pour le fret.*

Les recherches sont à poursuivre (industrie automobile et centres de recherche) sur les technologies de sécurité et d'identification, d'économie d'énergie et de conduite partiellement voire totalement autonome. Sur des parties importantes de trajets (autoroute par exemple), la conduite pourra être automatisée, cad régie par des algorithmes de contrôle, ce qui pourra conduire à des économies d'énergie. Par l'utilisation de nouveaux réseaux de capteurs, des informations sur le trafic peuvent être mesurées à de nombreux points de la route. Dans le même esprit des interfaces de communication –et services associés- entre véhicules et infrastructures sont à créer dans une approche systémique de la mobilité des personnes et des biens. L'ensemble de ces informations (trafic, météo, géolocalisation, ...) peut être utilisée pour développer des politiques innovantes et adaptatives de la gestion du trafic : contrôle des accès, limitation dynamique de la vitesse, routage dynamique des informations aux conducteurs (comme par exemple appui de la cartographie, de la géolocalisation pour localiser rapidement une place de parking). Tout ceci pour optimiser les temps de déplacement, les émissions de polluants et la consommation de carburant.

Afin d'optimiser les trajets et les modes de conduite, on pourra également développer le contrôle-commande des différents organes énergétiques du véhicule, et un tableau de bord « intelligent » intégrant des informations énergétiques (état de charge et de santé des batteries par exemple), de trafic, optimisation du trajet du point de vue énergie. Là aussi, il s'agit d'associer recherche et développement sur les composants, sur les modes de vie et les usages, en s'appuyant sur la réalisation de démonstrateurs.

Toutes ces évolutions impliquent des développements TIC, un partage à optimiser des données et des calculs entre le cloud, le véhicule intelligent et le smart-phone de l'usager, d'autant que cette répartition peut être dynamique en fonction des niveaux de charge de diverses batteries, le traitement massif de données de formes et supports multiples (cartographie, données véhicules, données trafic, vidéo, ...), ainsi que le développement d'automatismes (par exemple sécurité des véhicules autonomes, des piétons, ...).

On sait que les TICs jouent déjà un rôle essentiel dans le transport aérien: utilisation de la recherche opérationnelle pour la gestion des personnels et des aéronefs, organisation des hubs, maximisation du revenu. Ces développements pourraient être poursuivis pour l'optimisation énergétique (cf taxe CO2 par exemple) de cette activité du transport aérien. Des problématiques nouvelles se dégagent: optimisation des routes aériennes et donc de l'énergie nécessaire au vol, aide à la décision en contrôle aérien. Il en est de même pour la gestion des ports et des navires porte-conteneurs.

- ***TIC pour l'efficacité énergétique dans l'industrie :***

Le couplage entre TICs et énergie permettra d'augmenter l'efficacité énergétique de l'outil de production industriel français et ainsi d'augmenter sa compétitivité, avec en particulier le développement de systèmes de contrôle-commande plus précis, s'appuyant sur le traitement

en temps réel de nombreux capteurs permettant une optimisation en continu des processus, ainsi que de la maintenance préventive. Cette opportunité de meilleur couplage TIC & énergie est ancrée sur notre territoire où est déjà déployée une infrastructure très performante de télécommunication. Elle est partagée par les grands groupes industriels des secteurs technologiques comme par l'industrie plus traditionnelle des manufacturiers, les PME/ETIs, l'agriculture etc.

L'industrie a également besoin des sciences numériques pour développer la modélisation / simulation énergétique d'une part des procédés et du manufacturing associé, dont robotique, et d'autre part des sites industriels en vue d'optimiser leurs impacts énergétique, économique et environnemental, y compris par interactions et échanges de matière et/ou d'énergie avec des entreprises ou collectivités voisines. Les efforts doivent porter sur la prise en compte d'un nombre croissant de paramètres et de données et de contraintes sur ces modèles, l'utilisation de la réalité virtuelle en soutien au contrôle des procédés, ainsi que sur la simplification des interfaces homme-machine (tableaux d'affichages, synoptiques, ...).

De façon transversale à ces quatre domaines, ce couplage entre TIC et énergie fait apparaître des thématiques à développer de façon cohérente, dont modélisation-simulation, contrôle-commande, métrologie :

- De nombreux domaines requièrent un effort considérable *de modélisation et de simulation* : on peut par exemple citer
 - le domaine des réseaux avec la modélisation de l'architecture optimale des réseaux d'énergie (production, stockage, ...), le fonctionnement et la stabilité de multiples réseaux connectés (réseaux d'énergie et réseaux de données, ...), la compréhension et la prédiction de la production énergétique en fonction des aléas et évolutions climatiques, l'impact de politiques publiques, de facteurs économiques et financiers, etc.. .
 - le domaine des transports avec la modélisation des flux, du trafic, l'impact de paramètres exogènes (météo, ...) la fluidité des transports, l'optimisation énergétique des transports considérés isolément et couplés aux moyens de production et de stockage de l'énergie, et ce avec toujours le souci des conditions économiques associées.
 - Le bâtiment avec la maquette numérique déjà évoquée plus haut
 - L'industrie, avec la modélisation / simulation énergétique des procédés, du manufacturing et des sites industriels (cf § précédent)

Ces recherches impliquent un effort de modélisation soutenu, l'accès à des moyens de calcul intensif et de traitement massif de données, et une confrontation pour validation à des démonstrateurs ou au réel. Elles pourraient être développées au sein de plateformes regroupant les compétences très multidisciplinaires nécessaires et donner lieu au développement de modèles et applicatifs aussi ouverts que possible (open source ?) afin d'en permettre l'accès –par exemple sous forme de services- au plus grand nombre d'entreprises possibles, dont PME, ETI, start-ups qui n'auraient pas les moyens de développer en interne de tels outils.

- Sur l'ensemble des domaines technologiques évoqués (production, réseaux, habitat, transport), le besoin de *contrôle-commande en temps réel* indispensable à l'optimisation énergétique implique la capture et le traitement de l'information (avec souvent des flux importants de données) et l'activation de la boucle de contrôle, et ce avec des temps caractéristiques très différents suivant les systèmes considérés (habitat (minutes), automobile (fractions de seconde).. .). Le développement de ces technologies implique un effort de recherche combinant des équipes

pluridisciplinaires : capteurs, traitement de données, puces de contrôle, automatismes, actionneurs, réalité virtuelle, ...

Dans ce domaine particulier, la numérisation inévitable d'une partie des équipements nécessite des nouvelles avancées au niveau de la vérification formelle poussées aux niveaux à la fois matériel et logiciel. Egalement les interfaces de visualisation et de saisie sont complètement à revoir avec l'introduction de l'usage de tablette permettant de se déplacer et d'interagir sur le système simultanément, de saisir des données de façon précise et en temps réel, de collaborer avec des collègues répartis dans divers lieux.

Métrologie : comme évoqué à plusieurs reprises dans les § de domaines applicatifs précédents (production, stockage, transport et distribution d'énergie, bâtiments, transports et mobilité, industrie) il a fréquemment été fait référence aux besoins en métrologie. Cela concerne par exemple les problématiques de métrologie de fonctionnement des composants énergétiques comme par exemple les stockages afin d'en assurer la sûreté, la maintenance prédictive, la métrologie de l'efficacité énergétique des bâtiments en cas d'audit, de suivi de performances, ou de diagnostic énergétique, la métrologie des flux d'énergie électrique, compliqués par les ENR intermittentes, mais aussi afin de mieux évaluer les pertes, et diagnostiquer les défauts, etc... les exemples sont nombreux, qui tous passent par des capteurs plus nombreux, autonomes et communicants, du traitement de données –souvent temps réel- des algorithmes et logiciels d'exploitation de ces données. La récolte et l'analyse de ces données en flux continu n'est pas sans poser quelques défis en terme de filtrage (à la fois économie de stockage mais aussi protection de données privées cf §1.6,...), de stockage, d'archivage et du traitement de grandes masses de données.

TIC et politiques énergétiques

Deux domaines où le développement des TIC peut apporter des éléments utiles en matière de politiques énergétiques sont d'une part la problématique de la fixation des prix de l'énergie (localisation de la valeur de l'énergie le long de la chaîne) et d'autre part les apports des TIC aux débats sur l'énergie :

- **Les mécanismes de fixation des prix de l'énergie** (prix spot...) ont un impact clef sur la dynamique de développement des diverses solutions technologiques. Une recherche pluridisciplinaire - associant économistes, énergéticiens et numériciens – est indispensable pour éclairer les choix de la puissance publique et les entreprises, et développer des systèmes énergétiques économiquement cohérents.
- **TIC et débat sur l'énergie** : Il est utile d'associer le public aux choix en matière de recherche et technologie, en particulier dans les domaines sensibles de l'énergie (débat sur le nucléaire, le gaz de schiste, l'impact sur le paysage des énergies renouvelables par exemple). Les TIC pourraient jouer un rôle pour la recherche, la mise à disposition et l'agrégation d'informations spécifiques (organismes officiels, instituts de recherche, associations) « en temps réel », l'animation de débats.

TIC, Energie et société

L'introduction des TIC pour la gestion de l'énergie dans la vie quotidienne (à l'intérieur des logements individuels et collectifs, dans les transports, etc.) implique également des changements majeurs sur le plan sociétal (modes de vie, organisation, législation, etc.). Dans les prochaines années, on s'attend à des contraintes plus fortes pour les usagers, liées notamment au développement des réseaux intelligents avec des besoins accrus d'effacement

de consommation qui pourraient conduire les fournisseurs d'énergie à contrôler/piloter à distance certains équipements domestiques en échange d'un tarif aidé par exemple.

La recherche en Sciences et Humaines et Sociales est confrontée à de multiples questions imbriquées:

- tout d'abord concernant l'ergonomie des appareils de commande et la capacité des occupants (disponibilité, compréhension, praticité) à les utiliser
- ensuite comment concilier le respect de la vie privée avec des intérêts collectifs ou privés ? Les interrogations concernent la propriété des données, leur mémorisation, leur partage, la mise à disposition et l'éventuelle rétention des données recueillies ayant une utilité économique ou présentant un intérêt pour le distributeur d'énergie et ses concurrents potentiels, pour l'exploitant ou le gestionnaire d'un bâtiment, pour les communes ou les autorités publiques qui ont besoin de ces données pour orienter des politiques énergétiques.
- quel impact l'information sur les consommations d'énergie peut-elle avoir sur le comportement des occupants (quelles informations communiquer ? à quels moments ? sous quelles formes ? Les réponses varient selon la situation des occupants)
- parmi les questions situées fortement à l'interface Energie/STIC/SHS, on trouve également celles liées à la commande des systèmes : les TIC permettent en effet de fixer des principes de régulation et de répartir les droits de commande entre différentes entités (individus/ménages ou services dans une entreprise/gestionnaire de bâtiment/distributeur d'énergie): Quelles seront les répartitions des droits ? Quelle efficacité en termes de sobriété ou d'effacement ? Jusqu'à quel point faire évoluer ces répartitions ? Pour quels usages de l'énergie et avec quels systèmes techniques ?

10.2 Forces et faiblesses

Forces

Les compétences disciplinaires (composants pour les TIC, énergie...) sont souvent présentes au meilleur niveau au sein de la recherche publique (se reporter aux descriptifs dédiés dans les rapports Ancre et Allistène). Par ailleurs la France dispose d'acteurs industriels majeurs, bien implantés à l'international, sur plusieurs des axes ici considérés : Alstom, Bouygues, Bull, Dalkia, EDF, GDF Suez, Orange, Schneider Electric, STMicroelectronics, Vinci...

La France dispose également de forces reconnues dans le domaine des mathématiques pour l'énergie et de la finance pour l'énergie, ainsi que de la sûreté de fonctionnement / vérification des logiciels

Faiblesses

Si la qualité des acteurs de la recherche publique a été soulignée sur la plupart des axes cités, il convient de souligner le manque de transversalité : la capacité à agréger les diverses compétences (composants et systèmes pour l'énergie, composants issus des TIC, logiciel) autour de projets pluridisciplinaire est encore seulement émergente. Il conviendrait également de favoriser la fédération d'industriels français complémentaires autour de grands projets transverses et structurants, projets que l'Etat pourrait favoriser au travers d'investissements sur des démonstrateurs ou des projets de recherche.

Concernant les solutions logicielles pour les réseaux intelligents, aucun acteur Français n'a acquis une position comparable à celle d'acteurs américains (IBM, Cisco, ...) , présent sur la grande majorité des principaux démonstrateurs de réseaux intelligents dans le monde.

On note également des faiblesses sur les compétences en « optimisation » avec incertitudes (stochastic programming).

Comme dans bien d'autres domaines, les acteurs français sont peu présents dans les groupes internationaux de normalisation, malgré un enjeu industriel fort pour le développement du secteur.

10.3 Recommandations

Ces axes de recherche – production d'énergie, réseaux d'énergie, bâtiment et transport - font appel à des compétences fortes et cependant disjointes (plateformes de la microélectronique ou de l'électronique de puissance... - plateformes d'intégration pour par exemple les batteries – compétences logicielles...), alors même que les innovations et les ruptures se situent bien souvent aux interfaces entre domaines techniques. Au regard des investissements associés et de l'ampleur des compétences spécifiques et complémentaires à mobiliser sur chaque axe, plusieurs solutions peuvent être envisagées à différentes échelles :

Encouragement à la création d'équipes pluridisciplinaires ou de laboratoires mêlant les compétences TIC et énergie. Quelques exemples de laboratoires mixant des compétences TIC & Energie ont été identifiés¹⁰. Mais cet effort est à amplifier largement, comme par exemple autour des thématiques suivantes :

- Mathématiques et mathématiques appliquées à rapprocher des acteurs des systèmes et réseaux énergétiques en profitant de l'acquis des réseaux
- Green IT : couplage des compétences entre les acteurs des processeurs et autres composants microélectronique, et ceux des architectures logicielles, puis ceux de la conception de systèmes énergétiques (bâtiment, optimisation, récupération, ...)
- Apport d'intelligence au cœur même des composants énergétiques (gestion, diagnostic, auto-réparation, ...) qu'il s'agisse de batteries, de panneaux solaires, de systèmes de récupération d'énergie, pile à combustible, ...

Au-delà de l'encouragement institutionnel, financier et organisationnel nécessaire au développement de telles structures il sera utile de développer des outils méthodologiques pour les aider à surmonter les questions de sémantiques et d'ajustement des connaissances entre disciplines.

. Ces équipes sont souvent confrontées à des questions de sémantique

Cependant la solution ne peut résider dans la seule constitution de laboratoires mixtes. Un ***pilotage transversal***, appuyé sur des projets finançant ces problématiques dans leur globalité (TIC et logiciel – composants et systèmes pour l'énergie) est indispensable. Ce pilotage transversal fait aujourd'hui largement défaut au sein de la recherche scientifique ou technologique. Il convient de le créer de manière pragmatique, à diverses échelles au sein des organismes et des Alliances. Au niveau national, la thématique bénéficierait d'un suivi ad hoc, conjointement piloté par les Alliances Ancre et Allistene, dont ce GT pourrait constituer une préfiguration.

Soutien à la création de « plateformes » de modélisation / simulation : comme il a été souligné précédemment, un effort de développement d'outils de modélisation et de récolte de données est nécessaire pour accompagner le développement tant des réseaux que des

¹⁰ récente création de laboratoires mixtes LITEN – (LETI ou LIST), par exemple autour de l'électronique de gestion des batteries de puissance ou de la gestion des données énergétiques de l'habitat, le laboratoire commun Telecom ParisTech - EDF sur l'internet des objets et la sécurité ou encore le CISIT (Campus International sur la Sécurité et l'Intermodalité dans les Transports) créé en 2007 dans le cadre du Contrat de Projet Etat-Région (CPER 2007-2013) de la région Nord-Pas de Calais qui a pour objectifs de répondre aux besoins socio-économiques dans le domaine du transport et de la modalité, notamment en matière d'intermodalité, de sécurité, d'économies d'énergie et d'impact environnemental

transports ou encore du bâtiment. Il s'agit là aussi de rassembler les acteurs issus des diverses communautés pour conduire les projets pluridisciplinaires ici indispensables et permettre au plus grand nombre d'entreprises de bénéficier de ces développements.

Mise en place *d'appels à projets dédiés « TIC et Energie »*, pour amplifier et orienter les efforts multidisciplinaires et amener à davantage de concertation entre équipes. Ces appels pourraient être issus de l'ANR et de l'ADEME afin de couvrir l'ensemble des TRL. Néanmoins, à côté d'un possible ciblage sur quelques thématiques prioritaires, il est indispensable de soutenir une recherche "non thématique", en particulier pour les très bas TRL, afin de favoriser l'émergence de concepts en rupture et la mise en place de projets très interdisciplinaires (impliquant par exemple les Sciences Humaines et Sociales).

Par ailleurs *l'effort doit être rapidement renforcé sur des thèmes émergents*, dont le caractère stratégique peut être dès maintenant identifié, comme par exemple la stabilité des réseaux couplés, la cybersécurité,

Monter un groupe de réflexion sur *« comment gagner la bataille de la normalisation ? »* : s'associer avec des collègues européens pour promouvoir des solutions de technologies européennes dans les **groupes de normalisation** couplant TIC et énergie ? créer une dynamique et une reconnaissance pour les experts participant à ces groupes de normalisation ? Créer des binômes experts académiques/experts de l'industrie pour assurer la meilleure représentation du pays/de l'Europe dans ces groupes ?.

11. ALLISTENE-ATHENA - Numérique (Allistene) et Sciences Humaines et Sociales (Athena)

11.1 Bien-être et fragilité

Enjeu du point de vue des SHS

L'être humain est placé dans un environnement pouvant être hostile, tant sur le plan physique que psychologique. Le travail, la productivité, la sédentarité, la malnutrition, l'exposition à des pollutions (chimiques, sonores, environnementales...) sont autant de facteurs qui peuvent conduire au mal-être. Un des principaux enjeux est de remettre l'être humain au cœur de notre société, pour son bien-être. A la fois pour des raisons financières et sociétales, il est nécessaire que les nouvelles technologies soient pensées avec cette préoccupation alors qu'elles peuvent parfois contribuer à détériorer ce bien-être.

Enjeu du point de vue des STIC

Les nouvelles technologies s'appuient sur un nombre de plus en plus important de capteurs qui permettent d'enregistrer des données sur notre environnement, notre état et nos activités. Un des grands défis est de rendre ces technologies opérationnelles pour le bien-être du plus grand nombre, en travaillant sur la détection précoce de possibles troubles, sur la modification des conditions favorisant ce trouble, et sur sa prise en charge. La gestion de réseaux de capteurs, l'extraction de connaissances à partir des données, leur interprétation doivent conduire à une modification de notre environnement et de nos pratiques afin de favoriser ce bien-être.

Lien avec les défis

Le numérique au service de la qualité de vie. La santé et le bien-être sont des défis sociétaux clairement identifiés. Ils vont au-delà du traitement de populations pathologiques ou spécifiques mais doivent bénéficier au plus grand nombre. Que ce soit dans les entreprises pour la prise en compte du bien-être au travail, ou dans les loisirs pour lutter contre la sédentarité ou l'isolement vers lequel les nouvelles technologies peuvent parfois conduire.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

La plus grande rupture par rapport à l'existant doit se faire via une interaction plus forte entre SHS et STIC. Actuellement, de nombreux projets scientifiques impliquent les SHS en bout de chaîne, pour constater/analyser les usages/effets d'une nouvelle technologie. Il semble que ce schéma doive évoluer vers une plus forte connexion entre SHS et STIC, pour prendre en compte cette notion de bien-être à tous les stades du développement technologique, et ainsi remettre l'humain au cœur des développements.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Identifier les bonnes variables en lien avec le bien-être
2. Mettre en œuvre des réseaux de capteurs pour mesurer ces variables
3. Développer une méthodologie d'évaluation des technologies du point de vue de leur impact sur le bien-être

Exemples existants

Développement de capteurs et de réseaux de capteurs, fusion multi-capteurs
Développements d' « exergames » pour promouvoir l'activité physique.

11.2 Des bonnes pratiques de l'activité physique

Enjeu du point de vue des SHS

L'activité physique prévient un grand nombre de troubles, aussi bien métaboliques que psychologiques. Les campagnes se multiplient autour d'une pratique physique régulière accompagnée d'une bonne alimentation, mais les impacts restent limités. Quelles méthodes employer pour que ces messages soient suivis d'effet ? Cela passe nécessairement par une collaboration entre plusieurs disciplines des SHS, des sciences de la vie et du numérique. La Wii (Nintendo) et la Kinect (Microsoft) ont démontré la forte motivation apportée par ce type de technologie immersive, à tout âge. Au-delà de l'impact socio-économique de ces technologies, il semble pertinent de mener une réflexion pluridisciplinaire sur l'usage de ces technologies dans un réel but de prévention pour la santé.

Enjeu du point de vue des STIC

Un meilleur monitoring de l'activité physique dans le quotidien est un point clé. Les réseaux de capteurs embarqués, le traitement de signaux biologiques et la capture de mouvements in-situ ont encore de nombreux progrès à faire pour dépasser le simple cadre ludique. Les dispositifs immersifs entraînent une forte motivation mais les systèmes ludiques doivent évoluer pour inciter l'utilisateur à une meilleure hygiène de vie, et à poursuivre cette expérience virtuelle vers une pratique réelle en club. Comment rendre ces dispositifs accessibles au plus grand nombre ? Comment proposer des outils auteurs pour concevoir efficacement des programmes adaptés d'activité physique, suivi à distance dans le respect de l'éthique ? Faire évoluer les travaux sur le « Virtual Storytelling » pourrait apporter des réponses pertinentes à ces questions.

Lien avec les défis

4. Santé et bien-être ; 4.3. Interactions entre environnement, mode de vie et santé ;

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Les méthodes existantes se centrent principalement sur des aspects ludiques ou sur du monitoring de l'activité, sans quantification réelle, dans des cadres applicatifs bien précis (« Personal Ambient Living » par exemple). Développer un environnement numérique propice à motiver le sujet pour l'impliquer dans une vraie démarche d'activité physique reste un défi qui s'adresse à des chercheurs de différentes disciplines.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Monitoring de l'activité physique au quotidien
2. Systèmes immersifs pour le plus grand nombre, avec des outils auteurs efficace et individualisables
3. Utiliser la motivation apportée par les systèmes immersifs pour accompagner les messages « Manger bouger »

Exemples existants

Les applications liées à la Wii ou la Kinect, mais qui se focalisent sur les aspects ludiques, sans chercher à réellement impliquer l'utilisateur dans une réelle pratique physique. Le monitoring de sportifs de haut niveau dans un cadre très particulier et contrôlé.

11.3 Prévenir et accompagner la perte d'autonomie

Enjeu du point de vue des SHS

La perte d'autonomie peut avoir plusieurs sources et engendre des problèmes sociétaux importants, en plus des problèmes de santé. Il est possible d'intervenir à plusieurs étapes, de la prévention à l'accompagnement des personnes en perte d'autonomie. Intégrer ces personnes dans la société, par le travail, par l'accès aux infrastructures, à l'éducation contribue à l'égalité des chances des citoyens.

Enjeu du point de vue des STIC

Le diagnostic précoce des pathologies ou accidents conduisant à des pertes d'autonomie nécessite un accès le plus large possible à des moyens d'exploration. Développer des systèmes de monitoring conviviaux, dans le respect de l'éthique, alertant sur l'apparition de signes précoces à la dépendance est donc un point clé : développer de nouveaux capteurs, les rendre accessibles au plus grand nombre, les faire communiquer, et extraire l'information pertinente de la masse de données. Un autre moyen d'action consiste à améliorer le diagnostic clinique, d'utiliser les modèles numériques d'humains pour mieux simuler l'impact de traitements thérapeutique... Enfin la dernière approche consiste à fournir des palliatifs en développant des interfaces adaptées, favorisant la notion d'humain augmenté, de cybernétique, d'interfaces cerveau-machine, de stimulation électrique implantée... et de leur acceptabilité par les patients.

Lien avec les défis

4. Santé et bien-être ; 4.1. Progresser dans la connaissance du vivant ; 4.3. Interactions entre environnement, mode de vie et santé ; 4.2. Faire face au vieillissement de la population.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Avec le vieillissement de la population et l'exposition à de plus en plus de facteurs de risque (environnementaux et sociétaux), les nouvelles technologies doivent trouver une place dans la prévention et la prise en charge des personnes en perte d'autonomie. Les solutions doivent venir d'une collaboration entre sciences humaines et sociales et sciences et technologies afin d'assurer une large diffusion et un usage éthique et approprié de ces technologies.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Monitoring pour la détection précoce des risques de perte d'autonomie
2. Meilleure connaissance et modélisation de l'humain
3. Collaboration entre SHS et TIC

Exemples existants

Des projets européens et nationaux dans les appels « Ambient assisted living », ainsi que les projets collaboratifs sur le « physiological human ». De nombreux projets technologiques de monitoring mais encore peu de collaborations SHS-TIC sur ce sujet.

11.4 Accès à la formation tout au long de la vie

Enjeu du point de vue des SHS

Un individu est amené à s'adapter à son environnement, en particulier dans le monde du travail où les besoins et les méthodes évoluent très rapidement. La capacité de se former tout au long de la vie pour accompagner ces évolutions est fondamentale pour ne pas exclure une partie de la population de cette société moderne. Comment amener une population hétérogène à se former, à accéder à de nouveaux savoirs, à de nouveaux savoir-faire ?

Enjeu du point de vue des STIC

L'accès au savoir implique la conception aisée de contenus stimulants mais aussi riches de connaissances, le partage organisé de connaissances et de savoir-faire, le développement de systèmes automatiques d'entraînement, adaptables à l'utilisateur, individualisés. Comment définir des outils à la fois génériques et adaptés à chaque individu ? Comment faciliter la conception des contenus pour que ceux qui disposent du savoir puissent l'intégrer facilement dans des systèmes d'apprentissage en ligne ?

Lien avec les défis

Ce programme s'inscrit dans la lutte contre l'exclusion et les inégalités au sein de la société. La technologie est présente dans la quasi-totalité de notre quotidien et peut conduire à l'exclusion d'une partie de la population qui n'y serait pas formée. C'est en particulier le cas dans le monde du travail qui s'appuie de plus en plus sur ces nouvelles technologies pour améliorer la productivité, et qui conduit à une obligation de formation tout au long de la vie active.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

De nombreux travaux ont été menés pour constituer des Universités numériques, pour le partage de connaissances. Il reste à étendre ce travail pour le rendre disponible au plus grand nombre, et pas qu'aux universitaires. Il reste aussi à aborder le problème des savoir-faire pour lesquels ces formations à distance peinent à trouver des solutions accessibles à tous.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Faciliter la définition de contenus pour l'apprentissage
2. Développer des systèmes interactifs, des tuteurs numériques accompagnant individuellement l'utilisateur
3. Mieux connaître les facteurs qui entraînent la motivation d'apprendre, de s'impliquer dans un processus
4. Aborder le problème de l'acquisition de savoir-faire par le numérique

Exemples existants

Universités numériques, avec systèmes d'évaluation semi-automatiques
Systèmes d'entraînement à des tâches complexes ou dangereuses via des simulateurs numériques (type immersif)

11.5 Comprendre et accompagner les apprentissages

Enjeu du point de vue des SHS

La question des points d'articulation entre formes et espaces de pratique de l'apprentissage est centrale à étudier, de même que la spécificité des compétences en jeu. De nouvelles cibles émergent qui ne correspondent à aucun savoir formalisé (apprentissage perceptivo-gestuel et gestion du stress en situation à risque). Les prothèses et dispositifs de suppléance sensorielle posent de nouveaux défis en termes d'apprentissage et de rééducation. L'apprentissage doit être abordé dans sa dimension socio-technique: quels sont les écosystèmes de l'apprentissage, quels sont les processus de transfert, d'imitation en jeu, entre l'humain et son entour social, ou son entour virtuel (robot, agent conversationnel intelligent) ?

Enjeu du point de vue des STIC

Il s'agit de développer des dispositifs et modalités innovants pour l'apprentissage : apprentissage perceptivo-gestuel et nouveaux outils de capture du geste, du regard ou des émotions, environnement virtuels, « jeux sérieux », et robots pour l'apprentissage de tâches complexes, développement des prothèses et dispositifs de suppléance sensorielle.

Lien avec les défis

Défi 8.3 « éducation », 4.2 « faire face au vieillissement de la population », 7.1 « Formation, connaissance, décision »

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant

L'apprentissage humain est une problématique multiforme, qui touche tous les âges de la vie (de la naissance au vieillissement), tous les niveaux de la cognition individuelle et sociale (sensori-moteur, gestuel, non verbal, verbal, émotionnel, attentionnel, motivationnel, déterminants sociaux et culturels, normes et déviations), toutes les formes de connaissance (compétences, habiletés, expériences...) et de développement (psychopathologies, névroses), toutes les situations de vie (loisir, travail, mobilité) et formes d'organisation (humaines et virtuelles, scolaires et professionnelles). Dans le même temps se développent de nouveaux outils, de nouveaux dispositifs, de nouveaux lieux d'apprentissage. Mieux comprendre ces processus, les articulations entre ces facettes multiples de l'apprentissage, le rôle et la place des dispositifs d'apprentissage est un enjeu majeur pour soutenir le développement de l'humain aujourd'hui.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Approche multidisciplinaire associant les sciences de la vie (neurosciences), et plusieurs disciplines des sciences humaines et sociales et des STIC
2. Mise à disposition de plateformes écologiques multimodales pour l'expérimentation dans le domaine de l'apprentissage humain.

Exemples existants

De nombreuses [plateformes pédagogiques](#) existent, souvent sous licence libre. Dans le domaine de l'apprentissage perceptivo-gestuel, on peut citer le projet SIMULATORSE (Simulateur d'apprentissage pour la kinésithérapie respiratoire), ou le projet [TELEOS](#) (Plateforme d'apprentissage en chirurgie orthopédique).

11.6 Interfaces intelligentes

Enjeu du point de vue des SHS

L'être humain moderne manipule un grand nombre de données (films, photos, musiques...) et il devient crucial de trouver une manière naturelle, accessible à tous, de manipuler ces données. Le clavier et la souris ont créé une rupture dans la société, excluant certains de l'usage des supports numériques. Les nouvelles interfaces multimodales offrent potentiellement une infinité de manière d'interagir avec ces données. Comment déterminer celles qui permettront de ne laisser aucune partie la population en dehors de l'usage de ces supports numériques ? Quelles caractéristiques doivent avoir ces nouvelles interfaces naturelles ? Comment s'assurer qu'elles s'adaptent à l'utilisateur tout au long de sa vie ?

Enjeu du point de vue des STIC

Capter l'intention de l'utilisateur via des interfaces multimodales (geste, voix, toucher, signaux biologiques...), sur différents supports (ordinateur, tablette, téléphone...) est un véritable défi technologique. De nombreux capteurs existent, mais comment extraire l'intention de l'utilisateur de ces données capteur ? Chaque individu a sa propre expérience et ses propres représentations internes des données qu'il manipule. Il est donc essentiel de définir des interfaces intelligentes, capables de s'adapter et d'évoluer avec l'utilisateur pour lui offrir l'accès aux données, et introduire de nouveaux usages. Développer de nouvelles métaphores combinant diverses modalités d'interaction est donc la clé pour toucher la plus grande part de la population, pour les usages les plus larges possibles.

Lien avec les défis

Interaction des mondes physique, humain et numérique : capturer le comportement des utilisateurs tant externe qu'interne.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

De nombreuses équipes travaillent sur le développement de nouvelles interfaces, de nouvelles métaphores d'interaction, et sur l'évaluation des usages de ces technologies. Cependant, nous en sommes au début de ces travaux et le champ reste totalement ouvert concernant l'usage d'interfaces multi-modales immergeant l'utilisateur dans ses données, de manière naturelle. Nous nous dirigeons vers une fusion de l'ordinateur, de la « box » internet, de la console de jeu, de la TV et de téléphone. Le principal intérêt de cette fusion est de manipuler des volumes très importants de données hétérogènes pour lesquelles la télécommande ne suffit plus.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Nouvelles interfaces multi-modales
2. Evaluation des usages
3. Environnements immersifs pour la manipulation de données

Exemples existants

On peut évidemment citer les tablettes tactiles qui ont rapidement impliqué une grande part de la population dans la manipulation de données numériques. On peut aussi citer la Kinect (Microsoft) qui a été largement détournée du monde du jeu vidéo pour d'autres usages. Il existe actuellement une recherche très active dans le domaine des interfaces multi-modales, pour les différents supports disponibles.

11.7 Les conventions de visualisation de données

Enjeu du point de vue des SHS

Les usages multiples des grandes masses de données rendent plus difficile la mobilisation de conventions qui ont su être utilisées par les SHS pour les cartes ou pour les représentations visuelles en général (cf. Bertin). Au contraire, la prolifération actuelle de ces modes de visualisation aboutit à une alphabétisation impossible de générations d'étudiants et d'auteurs. Les SHS doivent pouvoir produire les conventions qui rendront appropriables les masses de données.

Enjeu du point de vue des STIC

Les STIC ont réalisé des avancées prodigieuses en matière de visualisation et continuent d'expérimenter tous azimuts, les designers devenant de plus en plus directement intégrés dans les processus de conception, les techniques de 3D dynamiques ouvrant encore la palette des possibilités. Le guidage vers quelques cadres cognitifs opératoires partagés doit permettre de passer de l'expérimentation à la production de conventions, au-delà de ce qu'Excel impose comme standard de fait.

Lien avec les défis

Big data, Digital Humanities

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Les communautés en data viz sont parmi les plus créatives et continuent de produire des innovations incessantes. Le big data et les enjeux de manipulation et d'exploration de ces données rendent encore plus cruciales ces innovations pour éviter l'infobésité. Les SHS notamment dans leurs composantes sémiotiques, cognitives et ergonomiques peuvent contribuer à sélectionner dans cette offre proliférante ce qui peut faire sens et donner lieu à une justification sur les processus d'accès à l'information ainsi permis. Plus encore, ce sont des conventions, domaine par domaine ou selon les technologies cognitives concernées, qui doivent être établies progressivement. Le format « liste » reste ainsi la base de l'accès aux résultats des moteurs de recherche, ce sont donc des processus de très long terme qui suppose de bien comprendre l'histoire de ces supports. L'enjeu est cependant important pour la socialisation de générations entières à l'exploration active de masses de données. Les STIC doivent alors récupérer cette validation comparative entre techniques expérimentées à ciel ouvert pour permettre leur amélioration ou pour offrir des pistes radicalement différentes si elles sont justifiables sur les plans cognitifs et sémiotiques.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Construire des cadres conceptuels permettant de comprendre ce qui a changé depuis Bertin dans la navigation de masses de données
2. Repérer dans les offres ce qui fait sens et/ou qui commence à s'installer comme convention, tester et justifier les choix ainsi faits.

Exemples existants

Les sites d'info viz créatifs sont légion.

11.8 Attention

Enjeu du point de vue des SHS

Comment les activités peuvent-elles se développer dans des environnements saturés d'informations et de sollicitation ? Comment les personnes gèrent-elles concrètement de multiples engagements et quelles compétences sont sollicitées ? Y a-t-il des manières de penser, apprendre et agir qui seraient particulièrement adaptées à de tels environnements ? Certains sujets seraient-ils particulièrement aptes à la mobilité ? Est-il possible de développer des formes de civilité adaptées à la multiactivité ? Des sujets dispersés peuvent-ils constituer un espace public bien réglé ?

Enjeu du point de vue des STIC

La prolifération des informations et des événements informationnels dans l'environnement des personnes, et les effets d'infobésité et de saturation qui en résultent détruisent la valeur des applications informatiques. L'enjeu est de développer une forme de conception attentive aux « écosystèmes » des utilisateurs et non plus centrés sur un dispositif unique.

Lien avec les défis

Impacte le lien entre information et décision (SHS), les formes que peuvent prendre les sociétés innovantes, ainsi que les problématiques de l'éducation et l'apprentissage.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

L'approche vise à la fois des enjeux de compréhension et de méthode, et de conception. Il s'agit de comprendre les compétences et les contraintes liées à la prolifération des informations, et de saisir comment elles sont mobilisées. Ceci nécessite des observations à grain fin de l'action, insuffisamment développées.

Du côté de la conception, il s'agit de basculer d'une logique de conception dont l'horizon est l'application et le service vers une prise en compte des écosystèmes d'usage.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Observer l'activité ou la multi-activité ; identifier les compétences mises en oeuvre
2. Repérer des modes de connaissance, d'apprentissage et d'agir qui émergeraient de ces situations et leur seraient particulièrement adaptés
3. Prendre en compte tout ce qui précède dans une conception centrée sur l'utilisateur dans son environnement global

Exemples existants

Etudes sur les comportements connectés, en particulier des jeunes

Débat publics et recherches sur des activités à risque (e.g. usages des TIC en conduisant)

Etudes dans le domaine éducatif sur les comportements d'apprentissage

11.9 Le verrou linguistique

Enjeu du point de vue des SHS

Les SHS sont devenues dépendantes des avancées en TAL qui irriguent tous les outils de traitement des contenus qu'elles collectent et produisent. Leur contribution théorique est cependant restée faible face à la puissance de calcul qui permet toutes les approximations statistiques : les approches pragmatiques ou cognitivistes n'ont pas apporté autant qu'annoncé. L'enjeu théorique de formalisation du langage comme processus humain reste entier.

Enjeu du point de vue des STIC

Les STIC ont investi de façon particulièrement efficace toute la recherche en linguistique car leurs modèles statistiques et leur puissance de calcul ont été extrêmement performants. Cependant, toutes les approches ont atteint des limites comme on le voit dans la traduction automatique notamment, même avec du machine learning. Comment expérimenter d'autres approches plus radicales sur le plan théorique tout en continuant à faire progresser ces approches plus classiques ?

Lien avec les défis

Interaction mondes physiques, numériques et humains

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Toutes les applications les plus couramment utilisées finissent par intégrer une forme ou une autre d'expertise linguistique notamment pour permettre de reconstituer des environnements les plus naturels possibles pour des utilisateurs toujours plus variés et peu formatés. Mais les promesses de la traduction automatique ou dans un autre domaine, du web sémantique, tardent à émerger. Il est probable que les méthodes d'apprentissage machine peuvent pousser plus loin les approximations qui faisaient office de traitement du langage jusqu'ici. Mais la question de fond reste puisque tous ces systèmes doivent encore faire comme si le langage était un étiquetage, ou même parfois une chaîne de caractères. L'analyse du langage en situation naturelle avec toutes les ambiguïtés qu'il comporte et que la communication réduit et renforce à la fois nécessite un effort théorique considérable du côté des SHS (et pas seulement de la linguistique) pour proposer de nouveaux cadres à tester et à rendre opérationnels du côté des STIC.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Définir les limites du machine learning et établir les questions vives
2. Réouvrir le chantier théorique du langage comme enjeu prioritaire avec un guidage des recherches en informatique par les SHS

11.10 Technologies réflexives

Enjeu du point de vue des SHS

Le développement des capteurs et des infrastructures de traitement des données en temps réel permet de fournir aux personnes des visualisations en temps réel de leurs pratiques calculées à partir des traces d'usage, et de les rendre visibles à des groupes sociaux bien choisis. Les enjeux SHS sont de comprendre les formes d'individuation qui en résultent (la performance du sujet comme « quantified self ») et des normes et des formes de régulation qui émergent de leur mise en réseau (le « gouvernement par les traces »)

Enjeu du point de vue des STIC

Mettre en place à grande échelle des infrastructures de types « smart grids » avec scalabilité, calcul en temps réel, simulation et visualisation de pratiques individuelles (enjeux d'ergonomie et d'interface). Couplage de ces visualisations avec des dynamiques de type réseaux sociaux

Lien avec les défis

Développement de nouvelles formes de régulation et de prise en charge des problèmes collectifs, en particulier dans les domaines de l'énergie, du transport, de la santé, voire aussi de l'alimentation

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Ces dispositifs sont émergents. Leur conception dépend d'un effort interdisciplinaire et d'une collaboration rapprochés. L'efficacité régulatrice supposée de ces dispositifs dépend d'enjeux à l'interface shs/stic, en particulier a) les problématiques d'IHM et des modes visualisation et b) les modes de mise en visibilité et en réseau des utilisateurs où se co-construisent liens « techniques » et obligations morales. Les technologies réflexives sont une fabrique du social, elles sont le site d'une redistribution possible des rôles traditionnels (par exemple celui du patient dans la chaîne de la santé) et d'un déplacement des foyers de la régulation (d'un mode top down vers des modalités plus horizontales). Peu d'expérimentations sérieuses ont été conduites et ce qui peut être performé avec eux reste largement à comprendre.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Faire travailler ensemble dans une logique interdisciplinaire, et de manière solidarisée par la construction de ces dispositifs informaticiens (capteurs, fouilles de données, traitement en tant réels), spécialistes des IHM et des interfaces, spécialistes des SHS
2. Expérimenter ces dispositifs dans des conditions durables d'appropriation, en variant les formes de visualisation et de mise en visibilité des pratiques individuelles

Exemples existants

Projets existants dans les domaines de la consommation électrique, la santé et la mobilité

11.11 Pervasive social computing - informatique socio-pervasive

Enjeu du point de vue des SHS

De nouveaux fondements sont à construire pour les sciences de l'information et de la communication. De nouveaux enjeux surgissent pour la cognition sociale, la pragmatique et la théorie de la rationalité. De nouveaux besoins et usages émergent, selon des typologies à définir. Les enjeux sont nombreux pour la privacy : l'intégration de ces sources hétérogènes peut permettre la construction d'informations sensibles (relation entre le taux d'activité, le stress, le taux d'interactions sociales et la performance au travail). L'obfuscation, la résistance à la collecte des données socio-pervasives, dans un contexte où la participation active au mouvement du réseautage social est de mise, sont des enjeux de recherche importants.

Enjeu du point de vue des STIC

Les enjeux vont de la mise en place d'infrastructures et de dispositifs de capture embarqués à la construction de graphes de pattern temporels multimodaux. La qualité des données est un enjeu central, en raison du caractère opportuniste de la prise de données (capteurs placés sur des personnes en situation de mobilité, selon des maillages dont la couverture ne peut être garantie, caractère imprévisible et informel des informations véhiculées via les réseaux sociaux). La fusion de données issues des sphères biologiques, cognitives et sociales soulève également des enjeux nouveaux. Les réseaux narratifs sont étudiés pour articuler ces sources de données hétérogènes dans des constructions retraçant l'expérience humaine.

Lien avec les défis

Thème peu présent dans le document actuel, à la marge du thème 8.2 « Analyse des transitions entre information et décision »

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Il s'agit de concevoir des applications couplant les données véhiculées par les réseaux sociaux (Social mining) avec les données issues de capteurs physiques (Pervasive Sensing). Plusieurs niveaux d'intégration sont possibles : nourrir les services pervasifs (agenda personnel) par des données « sociales » (événements publics), exploiter les réseaux (Twitter) pour organiser des données pervasives (météo locale), intégrer ces données au sein de services de monitoring (badge sociométrique pour le suivi des activités individuelles et des patterns d'interaction sociaux).

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Prendre en compte ces nouveaux enjeux dans les domaines de la pragmatique et de la cognition sociale
2. Formaliser les protocoles expérimentaux nécessaires à ces nouveaux contextes (collecte de données, scénarios d'usage, critères d'évaluation)

Exemples existants

De très nombreux exemples dans le domaine de la gestion des situations de crises ou d'urgences, avec un rôle grandissant joué par [Twitter](#). L'attente d'informations en provenance de ces sources comme la motivation pour y contribuer sont grandissantes. De nombreuses niches industrielles se développent avec des applications comme [Tweetronics](#).

11.12 Cybersécurité et fiabilité des systèmes

Enjeu du point de vue des SHS

Les travaux sur les risques existent depuis longtemps mais rarement confrontés à des architectures techniques aussi pervasives que celles créées par les réseaux numériques. Les catégories utilisées pour penser les identités, la vie privée, le droit applicable dans de tels environnements sont largement inadaptées à la mutation contemporaine. La fiabilité des organisations est-elle réductible à des modèles si l'on admet les processus tacites et la confiance qui les font tenir ?

Enjeu du point de vue des STIC

La puissance des algorithmes de cryptage et de surveillance est sans cesse remise en cause par l'innovation des cyberprédateurs de tous types. Peut-on mobiliser des concepts nouveaux en informatique pour traiter des enjeux aussi systémiques et pour éviter de se reposer sur la seule redondance ?

Lien avec les défis

STIC

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

On regroupe ici cybersécurité et fiabilité des systèmes qui pourraient sans doute être disjoints. Le défi posé est cependant notre capacité à garder la main sur des systèmes techniques dont la complexité génère de l'incertitude et de la vulnérabilité. Le défi est conceptuel voire philosophique mais il se traduit aussitôt par des challenges mathématiques d'un côté et par des enjeux juridiques de l'autre. En effet, la puissance de calcul ne peut suffire à justifier toutes les collectes de données, toute la confiance exigée, et génère une dépossession politique ainsi qu'un excès d'assurance de tous les acteurs, y compris dans le public, qui peut dès lors se retourner vite en défiance généralisée. Penser le développement de systèmes innovants et fiables suppose désormais de coupler les dispositifs techniques aux procédures et traditions organisationnelles et aux pratiques individuelles. Non pas pour les rendre acceptables après conception mais pour réinventer au cours même de leur conception les modes de relation entre systèmes techniques et humains. Les paradigmes de l'erreur humaine d'un côté ou de la prévention de l'autre ne suffisent pas à justifier l'insuffisance de ce couplage dans le cours même de la conception. Les enjeux juridiques ne sont pas périphériques mais doivent donner lieu dans le même temps à de l'invention juridique adaptée aux propriétés de ces systèmes et non issues d'un autre temps, tout en respectant la réflexivité propre au droit.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Tester de nouveaux cadres conceptuels sur le statut des données
2. Discuter le paradoxe de la modélisation de l'incertitude

11.13 Vie privée

Enjeu du point de vue des SHS

Impact des nouvelles technologies de l'information sur la vie privée, aussi bien d'un point de vue pratique, juridique que théorique. Doit-on repenser la notion même de vie privée ? A-t-elle encore un sens quand tout est capté, publié, diffusé, commenté sur les réseaux ? Peut-on résister à cette invasion sans précédent ? Si on ne peut s'y opposer, n'est-ce pas la vie démocratique même qui est menacée (atteinte à l'autodétermination des individus, conformisme anticipatif) ? D'un point de vue juridique, la notion de donnée personnelle est-elle toujours pertinente quand des algorithmes de plus en plus sophistiqués permettent de recouper des informations apparemment anodines, voire anonymes, pour en dériver des informations sensibles ? La distinction public/privé est-elle encore opérante ? Les modes de protections actuels, fondés sur des contrôles a priori sont-ils encore viables ? Quels rôles pour le législateur, les autorités de protection, les acteurs industriels, les individus ? Peut-on protéger les individus contre eux-mêmes ? Le consentement du sujet est-il vraiment une protection quand il est en réalité accordé de manière machinale sans information compréhensible ni véritable choix de la part de la personne.

Enjeu du point de vue des STIC

Comment offrir aux individus un meilleur contrôle sur leurs données personnelles (soit en évitant leur divulgation – chiffrement, anonymat – soit en la maîtrisant à travers des modes d'expression de choix bien informés) ? Comment réduire le déséquilibre entre collecteurs de données et individus ? Comment mettre en œuvre des mécanismes d'« accountability » fiables qui responsabiliseraient les collecteurs de données ?

Lien avec les défis

7.1 (décision), 7.2 (sécurité de la société numérique), 7.3 (traitement de données massives), 8.2 (analyse des transitions entre information et décision).

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Il s'agit de comprendre l'impact du développement des technologies de l'information sur la notion de vie privée et sur les manières de la protéger.

Doit mobiliser des travaux de nature expérimentale (compréhension des comportements) et théorique dans des disciplines variées (sociologie, droit, économie, informatique, etc.).

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Analyser les comportements des acteurs (individus, acteurs économiques, états) et leurs conséquences en matière de vie privée (évolution de sa perception, atteintes, dommages, etc.)
2. Analyser les limites des outils juridiques en matière de vie privée
3. Proposer des instruments (techniques, juridiques, sociaux, économiques) permettant une meilleur contrôle sur la vie privée (aussi bien a priori que a posteriori via l'accountability).

Exemples existants

Nombreux travaux sur la vie privée (droit, philosophie, informatique, économie)

11.14 Aménagement urbain plus humain

Enjeu du point de vue des SHS

Le milieu urbain concentre une grande partie de la population et doit être pensé dans une optique durable, en mettant l'humain au centre des préoccupations : son bien-être, l'accès aux bâtiments et aux infrastructures en toute sécurité, l'aménagement des transports laissant une place au piéton. Vu la complexité et la multiplicité des paramètres à considérer, la simulation numérique est un moyen tout à fait prometteur pour envisager les transformations nécessaires à l'aménagement de systèmes urbains durables.

Enjeu du point de vue des STIC

Simuler des systèmes complexes, multi-échelles, multi-agents, incorporant à la fois des connaissances macroscopiques et microscopiques sur le comportement est un véritable défi pour l'aménagement des milieux urbains durables. Ceci impliquera de dépasser la simulation de particules soumises à des forces sociales, mais de modéliser le comportement individuel humain. Comment spécifier ces comportements individuels dans des groupes de plusieurs milliers d'utilisateurs ? Le sketching semble être une voix prometteuse pour offrir des outils efficaces aux concepteurs de milieux urbains. Enfin, l'un des plus gros défis à relever consiste à définir des modalités de validation de ces simulations multi-échelles. Un autre défi sera de définir des architectures matérielles et logicielles capables de faire tourner ces simulations dans des environnements immersifs, interactifs, pour tester le résultat en situation quasi-écologique.

Lien avec les défis

Mobilité et systèmes urbains durables : les systèmes urbains durables. Adaptation aux besoins des usagers et à la flexibilité des usages, prise en compte des enjeux sociaux (précarité énergétique, accessibilité), sécurité des bâtiments et des équipements (structure, séisme, feu), accès aux services de santé, de formation, d'éducation, accès aux réseaux d'eau, de transports, amélioration du cadre de vie, accès aux biens culturels, accès à l'activité et à la vie économique...

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

De nombreux travaux existent dans ce domaine, mais les simulations manquent cruellement d'individualisation des comportements. Une collaboration SHS-STIC plus forte serait nécessaire pour extraire de l'information de situations réelles, modéliser le comportement individuel des citoyens, valider les simulations et étudier le comportement d'utilisateurs dans ces milieux urbains simulés.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Simulation comportementale multi-échelle
2. Interfaces de spécification des comportements à grande échelle via le sketching
3. Architectures pour le calcul efficace de grands environnements urbains

Exemples existants

De nombreux programmes de recherche nationaux et européens existent pour l'aménagement de quartiers ou de bâtiments. Ces simulations reposent sur des modèles très simplifiés de comportement.

11.15 Facteurs humains dans l'usine du futur

Enjeu du point de vue des SHS

Productivité et bien-être au travail ont souvent été opposés par le passé. La pénibilité au travail est devenue un enjeu de société qu'il faut prendre en compte dans la recherche de performance de l'entreprise. Modifier la notion de performance de l'entreprise pour qu'elle intègre les facteurs de réussite de ses employés est un point clé. Avec le vieillissement de la population, les cadences importantes, l'obligation de se former tout au long de la vie pour conserver son travail... il est important de remettre l'homme au centre du débat sur la performance, pour une société ne laissant personne sur le bas-côté.

Enjeu du point de vue des STIC

Simuler un système complexe comme une entreprise, en y incluant les facteurs humains, via des systèmes multi-agents, autonomes, doués de comportements locomoteurs réalistes, et capables d'estimer les contraintes physiologiques encourus restent des défis technologiques. Concevoir une meilleure collaboration entre l'homme et la machine, développer des systèmes robotiques pensés pour le travail collaboratif avec l'homme, des systèmes d'exosquelettes soulageant l'opérateur des charges biomécaniques les plus pénibles est un moyen de pallier à des contraintes incontournables de certains postes de travail. Apprendre des gestes techniques dans des systèmes immersifs, plus proches de la réalité terrain, permettrait un meilleur transfert des compétences pour un geste plus juste, un poste de travail préservant mieux l'opérateur pour le faire contribuer à la performance de son entreprise.

Lien avec les défis

3.1. Donner aux moyens de fabrication existant une nouvelle compétitivité par la mise en œuvre des technologies de 'manufacturing' avancé ; 4.3. Interactions entre environnement, mode de vie et santé

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

L'opposition entre productivité et santé des opérateurs sont encore trop souvent opposés. Développer des recherches encourageant à la fois la recherche de performance et la préservation de l'intégrité des opérateurs est un point clé pour redonner de la compétitivité aux entreprises.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Modélisation des facteurs humains dans les simulations d'usines numériques
2. Transfert des compétences acquises en immersif vers des postes de travail réels
3. Collaborations hommes-machines pour un bon compromis performance/bien-être au travail

Exemples existants

De nombreux projets d'usines numériques ont vu le jour mais intègrent assez mal les facteurs humains dans leur simulation. La variabilité entre les situations réelles dans l'entreprise et les simulations est encore trop grande. Des développements d'aides robotisées ont vu le jour au Japon et quelques rares exemples en France.

11.16 Techniques de mesure du climat

Enjeu du point de vue des SHS

L'accès moderne à la nature s'est fait à travers des médiations techniques qui sont toutes aujourd'hui radicalement transformées. Les études STS de toutes les nouvelles pratiques de captation et de traitement des données sont indispensables.

Enjeu du point de vue des STIC

Les techniques de captation des données doivent devenir plus précises, plus réactives, plus prédictives et mieux couplées avec leur environnement et avec les divers publics : 3D, immersion, distribution en grid, etc.

Lien avec les défis

Climat, énergie

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Le réchauffement climatique devrait remettre en perspective toutes les politiques et activités humaines. Or ce n'est pas le cas. L'équipement de la perception des risques et des enjeux joue un rôle dans cette relative irresponsabilité. L'analyse des pouvoirs propres aux capteurs, aux centres de calculs, aux visualisations, aux traces, sur le plan cognitif et politique à la fois, permet de reconstituer toute la chaîne de médiation qui aboutit à un cadrage (framing) des problèmes (issues) différent à chaque fois. Ces travaux peuvent ainsi proposer un pluralisme des modes de captation, de traitement, de représentation qui doit donner lieu à innovations techniques motivées sur le plan de la citoyenneté, au niveau des activités individuelles les plus ordinaires, des collectifs concernés en situation et des débats publics formels.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Inventaire des méthodes et techniques de constitution des problèmes du climat en problèmes publics
2. Proposition de pistes de recherche en développement technique numérique pour répondre à ces cahiers des charges
3. Expérimentations et suivi

Exemples existants

Equipement des débats publics

Formes collaboratives de collecte de données dont crowdsourcing

Expérimentations de visualisations pour la culture scientifique et technique et pour la recherche à la fois.

11.17 Les techniques de marché (financier)

Enjeu du point de vue des SHS

Le constat et/ou la critique de la puissance de la financiarisation de l'économie a pris en compte en surface les rôles spécifiques joués par des algorithmes innovants, permettant d'engager toute la finance vers une chaîne de produits dérivés totalement incontrôlable. Cependant, une analyse proprement SHS des processus d'installation de ces algorithmes reste à faire et nécessaire pour proposer des régulations autres que cosmétiques.

Enjeu du point de vue des STIC

Les réseaux sont une condition vitale pour l'économie financiarisée mais plus encore les innovations algorithmiques permanentes auxquelles le secteur a été soumis. La traçabilité de ces innovations, leur contrôle de fiabilité ont été clairement insuffisants. Comment doter ces mécanismes des dispositifs de surveillance intrinsèques qui éviteraient leurs effets destructeurs en cascade ?

Lien avec les défis

Technologies et régulation dans les pratiques sensibles, en particulier économiques

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Le cadre général des mécanismes spéculatifs et des bulles est connu dans l'économie financiarisée. Cependant les médiations par lesquelles ces systèmes se sont installés et ont réussi à coloniser tous les esprits ne sont pas connus en détail, car peu nombreux sont ceux qui comprennent précisément les processus à l'œuvre du point de vue mathématique mais aussi du point de vue organisationnel. Un effort conjoint de recherche sur ce cœur de crise devrait permettre d'établir un diagnostic et de proposer des réformes opérationnelles tenant compte des aptitudes organisationnelles à l'ignorance des alertes et des critiques. Des équipes mixtes SHS/ STIC (mathsinfo) étroitement couplées doivent engager une enquête approfondie sur le terrain avec les autorisations nécessaires pour réaliser des investigations dans les secteurs soumis au secret. Les chances de succès de toute régulation future dépendent de la qualité de ces diagnostics qui devront déboucher sur des propositions de réforme opérationnelles (ex : comment faire perdre de son intérêt au High Frequency Trading en réglementant certains délais de réaction ou la non exécution de certains ordres lancés par pur effet de manipulation des marchés ?)

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Constituer des équipes complémentaires et interdisciplinaires
2. Les doter légalement de pouvoirs d'enquête étendus

Exemples existants

Les travaux d'analyse des anciens outils comme le ticker (Preda A. *Réseaux*, 21/122, pp.137-165).

11.18 Crowdsourced intelligence

Enjeu du point de vue des SHS

L'enjeu est de mettre en place les fondements théoriques et les modèles pour aborder ce mouvement, en analyser les formes, les motifs, les limitations, les biais et les conséquences, identifier et caractériser les populations de contributeurs (pressentiments, intuitions et perceptions subjectives, motivations, attentes et intérêts tacites) et leur productivité (apport d'une foule de contributeurs anonymes vs une petite quantité d'experts), penser la régulation et le contrôle des systèmes et des communautés de crowdsourcing (modèles d'incitations, de récompense, de profiling, de vote, de débat...) et leur lien à la qualité et au coût des résultats obtenus (comment augmenter la « sagesse des foules » et les comportements responsables ? l'intelligence collective peut-elle s'opposer à la dissémination des rumeurs ?), analyser les systèmes de valeur et de marché associés à ces approches, interroger les questions éthiques soulevées dans un contexte où la pression industrielle est forte et se traduit par divers mécanismes d'incitation financière.

Enjeu du point de vue des STIC

Les enjeux sont nombreux et multiformes : modèles de conception, langages et environnement de programmation, exploitation du crowdsourcing pour la conception de ces modèles, sémantique, pragmatique et émergence du sens dans les systèmes de tagging collaboratif, apprentissage à partir de données augmentées ou annotées (crowd-annotated or crowd-augmented datasets), contrôle qualité des tâches et des contributeurs (mise en place de questionnaires de profiling, détection automatique de comportements de confiance, malveillants ou frauduleux).

Lien avec les défis

Thème peu présent dans le document actuel, à la marge du thème 8.2 « Analyse des transitions entre information et décision »

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

La tendance est grandissante d'exploiter l'intelligence humaine et de bénéficier de sa pluralité pour résoudre des problèmes encore hors de portée des sciences du numériques (comme la classification et l'annotation d'images ou de vidéo, la construction et l'alignement d'ontologies, la plupart des tâches d'évaluation de systèmes numériques), développant en cela une sorte d'« Intelligence artificielle artificielle ». Les technologies du crowdsourcing, qui se déploient extrêmement rapidement dans le milieu industriel soulèvent de très nombreux enjeux scientifiques, sociétaux et éthiques et le risque est grand de voir la communauté académique « à la traîne » de ce mouvement de grande ampleur.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Mettre en place des schémas incitatifs pour soutenir la recherche académique dans ce secteur émergent
2. Développer les outils du débat, de la controverse, de l'argumentation

Exemples existants

Les enjeux industriels sont grandissants (cf le [Mechanical Turk](#) d'Amazon). Dans la conférence TREC (Text REtrieval Conference), une [session](#) est dédiée à l'usage du Crowdsourcing pour l'évaluation des systèmes de recherche d'information.

11.19 Web participatif solidaire

Enjeu du point de vue des SHS

Soutenir les études concernant les relations entre Web, singularités individuelles, transformation sociale et régulation d'accès aux contenus et service. Analyser et cartographier les besoins, usages et acteurs des sphères très mouvantes de l'économie sociale et solidaire, des services territoriaux, des initiatives citoyennes.

Enjeu du point de vue des STIC

Développer le web dans ses dimensions organisantes de coordination de services, participatives de co-construction d'offres et de solutions, singulières de personnalisation des accès et de prise en compte du caractère singulier des demandes. Renforcer les recherches sur les questions de la confiance.

Lien avec les défis

Thème malheureusement peu présent dans le document actuel

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Le Web peut être appréhendé comme un objet sociotechnique, à la fois lieu d'intégration de différentes technologies, offre de services, support à de nouveaux modes d'organisation sociale, et sources de nouvelles formes de régulation dans l'accès aux ressources. A ce titre, il joue un rôle grandissant dans les processus d'innovation sociale (partage et confidentialité des dossiers familiaux, décloisonnement et coordination des équipes éducatives au service des enfants en difficulté, partage d'expériences en matière de détection et de réhabilitation de logements insalubres, mise en synergie d'acteurs militants au moyens de réseaux sociaux, participation d'usagers des transports en commun à la définition de meilleurs services, élaboration participative de documents d'urbanisme, ...).

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Opérer en faveur d'un décloisonnement des sphères de l'innovation sociale (acteurs de l'Internet Accompagné, de l'économie sociale et solidaire, collectivités territoriales...) et des sphères de l'innovation technique (acteurs académiques STIC et SHS et industriels)
2. Développement d'une hypertoile au service d'une économie sociale et solidaire et d'appropriation citoyenne (cf. rapport Bravo « [la société de l'économie à l'aune de la révolution numérique](#) », mai 2009).
3. Mettre en place des laboratoires des usages du Web citoyen et solidaire - Développer les outils de veille sur les usages innovants du Web.

Exemples existants

En Rhône-Alpes, on peut citer la plateforme www.rhone-Alpesolidaires.org ou la Coordination Rhône-Alpes de l'Internet Accompagné (CoRAIA). Imagination for People (I4P) fédère une communauté de citoyens qui croient au pouvoir de la créativité pour trouver des solutions concrètes contribuant au mieux-vivre ensemble. CRÉATIF est une association engagée dans la conduite et la promotion d'actions de sensibilisation du public aux technologies de l'information et de la communication pour le compte de collectivités territoriales, structures, associations ou administrations décentralisées. CRÉATIF, qui s'appuie sur une pluralité de dispositifs d'accès publics, de démarches et de territoires, favorise l'appropriation sociale et citoyenne des technologies de l'information.

11.20 Equiper la démocratie en réseaux

Enjeu du point de vue des SHS

Les mouvements sociaux les plus divers font un usage abondant des réseaux sociaux sans que ces dispositifs soient explicitement intégrés dans les procédures démocratiques. Les SHS doivent avancer dans la compréhension des dynamiques sociales et politiques à l'œuvre dans ces usages pour faire des préconisations d'adaptation des architectures techniques et institutionnelles.

Enjeu du point de vue des STIC

Les dispositifs les plus utilisés par les citoyens ont rarement été développés à des fins citoyennes. Les spécifications de ces plates-formes s'en ressentent et les STIC ont une responsabilité dans la mise à disposition d'outils à toutes les phases de la participation citoyenne (ex : pendant un débat public ou pour faire signer une pétition).

Lien avec les défis

L'équipement et la transformation des formes de participation aux processus collectifs et citoyens.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Les mouvements citoyens exigeant une participation ou une démocratie dialogique se sont développés partout dans le monde. Ils ont fait un usage massif des plates-formes de réseaux sociaux commerciales à leur disposition (Facebook et Twitter principalement). Ces dispositifs sont d'une part non conçus pour des finalités citoyennes (par exemple aucune utilité pour construire des documents en commun ou voter ou cartographier des débats en cours) et d'autre part ils sont propriétaires et prédateurs de données sur une mode contradictoire avec les visées citoyennes des usages qui en sont faits (d'où contrôle possible par les forces non démocratiques). Le développement d'architectures techniques à vocation citoyenne se fait dans certaines niches avec des outils comme des pads par exemple pour du travail collaboratif ou des outils de pétition en ligne, mais leur impact et leurs qualités d'expérience utilisateurs demanderaient encore largement à être améliorés pour rendre effective leur appropriation. Un plan de développement et de soutien aux développements spontanés devraient prendre appui sur des recherches détaillées en SHS pour comprendre les ressorts et les types variés d'engagement et d'activité en question. Ces travaux permettraient de fournir des spécifications plus fondées aux laboratoires en STIC capables de développer ces architectures.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Faire l'inventaire des dispositifs utilisés dans les démarches citoyennes et décrire leurs spécificités fonctionnelles d'un point politique et organisationnel
2. Fournir des spécifications précises sur les manques ou les pratiques existantes non équipées sur des plates-formes indépendantes et ouvertes.

Travaux sur l'équipement des débats au LIRMM à Montpellier et à l'IRI au centre Pompidou.

11.21 Décision

Enjeu du point de vue des SHS

Comment la prolifération des informations accessibles influence-t-elle les décisions des individus, des collectivités, des pouvoirs publics ? Est-ce qu'elle permet de renforcer l'auto-détermination des personnes (en réduisant l'asymétrie informationnelle) ou au contraire accroît les risques de manipulation ? Comment tracer l'origine des informations, estimer leur qualité, démasquer les manipulateurs ? Quel effet de manière globale sur les sociétés, les manières de les gouverner ? Va-t-on vers une « gouvernamentalité algorithmique » ? Quelle incidence sur la responsabilité des décideurs, des diffuseurs d'information ? Jusqu'où peut-on aller dans l'aide à la décision sans déresponsabiliser les décideurs ?

Enjeu du point de vue des STIC

Comment tracer les informations, les maîtriser à grande échelle, les protéger, les recouper, les expliquer, mesurer leur qualité ? Comment justifier les connaissances ou les prédictions produites par des algorithmes ? Liens avec le Big Data, le raisonnement automatique, l'aide à la décision.

Lien avec les défis

7.1 (décision), 7.2 (sécurité de la société numérique), 7.3 (traitement de données massives), 7.5 (numérique au service de la qualité de la vie), 8.2 (analyse des transitions entre information et décision).

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

Il s'agit de comprendre l'impact de la prolifération des informations sur l'autonomie des individus et de fournir des outils conduisant à un renforcement de cette autonomie plutôt qu'à une nouvelle aliénation.

Doit mobiliser des travaux de nature expérimentale (compréhension des comportements) et théorique dans des disciplines variées (sociologie, psychologie, droit, informatique, etc.).

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Analyser les comportements et leurs évolutions
2. Analyser, d'un point de vue théorique, les limites des outils en matière de décision (ou d'aide à la décision)
3. Imaginer des outils permettant une meilleure gestion des connaissances au service d'une prise de décision éclairée et responsable

Exemples existants

Volet expérimental : études des relations d'influence entre acteurs économiques (sociétés, lobbies), individuels (réseaux sociaux) et politiques.

Volet théorique : réflexions sur la gouvernamentalité algorithmique, le pouvoir des statistiques, etc.

Volet informatique : provenance, traçabilité des informations

11.22 Innovation, STIC et partenariats SHS-industries

Enjeu du point de vue des SHS

Valoriser les SHS dans le monde de l'entreprise, particulièrement dans l'industrie.

Soutenir les formations et l'insertion professionnelle des doctorants et post-doctorants en SHS,

Aider au financement des recherches SHS appliquées et impliquées.

Enjeu du point de vue des STIC

Disposer d'un lien permanent avec les technologies en train de se faire (moins de discours surplombants sur les STIC, mais une bonne information),

Développer des « terrains d'enquête » et d'expérimentation,

Etablir un dialogue continu et de qualité entre directions industrielles de R&D et d'innovation avec le monde académique.

Lien avec les défis

Intégrer les SHS dans les processus d'innovation technologique pour compenser les logiques techno-push encore dominantes,

Développer l'analyse des contributions des utilisateurs (économie « contributive, participative, coopérative... ») venant des réseaux sociaux ou d'autres formes de « contribution » (fablabs par ex.),

Contribuer à l'analyse critique de la « troisième révolution industrielle », enjeu majeur.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

La vitesse de l'innovation technologique dans le domaine des TIC est si rapide (innovation intensive) que les recherches SHS doivent être informées de ce qui est en cours dans les grands laboratoires industriels, dès l'amont des processus d'innovation. A la fois pour y être associés et engager le dialogue sur les choix et les hypothèses et pour être informés.

Certes, il existe déjà des liens entre certains laboratoires SHS et l'innovation industrielle, mais cela demeure exceptionnel : c'est surtout le fait de quelques grandes écoles, et c'est beaucoup plus rare à l'Université où se trouve l'essentiel des formations et recherches en SHS.

Cela pourrait conduire à renforcer le lien Universités-formations SHS des Universités et directions de l'innovation des industries françaises et européennes.

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Définir des problématiques de recherche d'intérêt commun entre industries (et pas seulement celles dites du « numérique »)
2. Etablir des langages, corpus communs et concepts-clefs, pour faciliter les dialogues et échanges entre les chercheurs des SHS et le monde industriel (dominé par les cultures des ingénieurs et techniciens),
3. Développer des profils et responsabilités de chefs de projets chez les enseignants/chercheurs volontaires et les soutenir par des incitations.

Exemples existants

Minatéc Ideas Lab - Grenoble

Chaires Mines Paris Tech et Télécom Paris Tech

CSI Mines

Sciences Po Paris Media Lab

11.23 Innovation et création, arts, SHS

Enjeu du point de vue des SHS

Développer les recherches en SHS avec les pratiques et les disciplines artistiques et le monde de la création, à des fins d'innovation dans le champ des TIC,
Développer les recherches des écoles d'art et de design et aider à les doter d'un corpus et de méthodes de recherche,
Favoriser les projets de recherches et la co-tutelle de thèses SHS-disciplines artistiques-design.

Enjeu du point de vue des STIC

Contribuer de façon active et critique aux travaux sur la création et la créativité dans les processus d'innovation,
Développer les collaborations avec les écoles d'art et de design, voire les musées,
Favoriser les recherches sur la créativité et la création en SHS,
Développer la recherche sur le design et les arts.

Lien avec les défis

Mieux intégrer les SHS dans les processus d'innovation et de création,
Favoriser l'interdisciplinarité,
S'appuyer sur les techniques numériques et la 3D pour développer les coopérations SHS-arts.

Argument (visée de la recherche, apport par rapport à l'existant)

D'un côté, les écoles d'art (ENSAD, ENSBA, FEMIS) et les Ecoles de design cherchent à développer leurs compétences en matière de recherches : les SHS pourraient y contribuer par des projets communs.

D'un autre côté, l'innovation technologique fait appel toujours plus au design (ex le « modèle » Apple), à la création et à la créativité. Et la France dispose d'une riche tradition dans ce domaine avec les industries du luxe et de la création, mais qui ne sollicitent pas suffisamment les SHS.

Ces collaborations sont nécessaires pour enrichir et repenser les processus d'innovation technologique dans le domaine de la création étendue au numérique, à la 3D, qui ouvrent des nouvelles possibilités de création.

De façon plus générale, l'apport des artistes est indispensable à l'innovation technologique, à côté de celui des ingénieurs et des SHS (économie, ergonomie, psychologie, etc).

Points clés pour faire avancer la recherche

1. Définir des problématiques de recherche d'intérêt commun entre SHS et écoles d'art et de design,
2. Etablir des langages, corpus communs et concepts-clefs, pour faciliter les dialogues et échanges entre les chercheurs des SHS et le monde artistique
3. Développer des laboratoires communs de recherche et d'expérimentation SHS-arts-design avec les techniques 3D (« cave ») et de réalité virtuelle,
4. Développer des projets communs, notamment des thèses en co-tutelle.

Exemples existants

MSH Paris Nord : programmes de recherches,
Création de directions de recherches à l'ENSAD, la FEMIS, l'ENSCI, Strate College, IRI-Centre Georges Pompidou (et anciennement l'IRCAM),
Université Paris 5 (ex Todd Lubart en psychologie sur la créativité),
Université Rennes 2 en arts numériques.

Partie III - Liste des experts

Comité de coordination d'Allistene

Michel Cosnard (Inria), Président du comité de coordination
Jean-Frédéric Clerc (CEA)
Christian Lermaniaux(CDEFI)
Michel Bidoit (INS2I CNRS) et **Olivier Goubet** (INSMI CNRS)
Brigitte Plateau (CPU)
Francis Jutand et **David Sadek** (Institut Mines Télécom)
Claude Kirchner (Inria)

Pôles de compétitivité du Numérique

Stéphane Distinguin et **Pierre Danet** (Cap Digital)
Vincent Marcatte et **Gérard Le Bihan** (Images et Réseaux)
Loic Lietar et **Jean Chabbal** (Minalogic)
Laurent Londeix et **Georges Falessi** (Solutions Communicantes Sécurisées)
Jean-Luc Beylat et **Jean-Pierre Tual** (Systematic)

Groupes de travail Allistene – Pôles

Technologies logicielles:

Responsables :

Gérard Berry (Collège de France)
Gérard Cristau (Thales)

Membres :

Ana Cavalli (Télécom SudParis)
Pierre Danet (Hachette)
Yassine Lakhnech (Université Joseph Fourier)
Jean Philippe Lerat (Sodius)
Jean Noel Patillon (CEA)
Brigitte Vallée (CNRS)

Formation, connaissance, décision:

Responsables :

Mokrane Bouzeghoub, (Université de Versailles et CNRS)
Mathieu Nebra (Simple IT/Site du Zéro)

Membres :

Gilles Dowek (Inria)
Luis Farinas (CNRS)
Stéfane Fermigier (Abilian)
Jean-Marie Gilliot (Télécom Bretagne)
Christophe Lecante (TKM)
Jean Noel Patillon (CEA)

Sécurité de la société numérique:

Responsables :

Claude Kirchner (Inria)

Jean-Pierre Tual (Gemalto)

Membres :

Frédéric Cuppens (Télécom Bretagne)

Sébastien Gambs (Université de Rennes 1)

Olivier Heen (Technicolor)

Jean-Philippe Nomine (CEA)

Bruno Rouchouze (Gemalto)

Brigitte Vallée (CNRS)

Traitement des données massives, calcul haute performance, et simulation numérique:

Responsables :

François Bodin (Caps Entreprises)

Françoise Soulié Fogelman (KXEN)

Membres :

Laurent Crouzet (CEA)

Michel Daydé (INP Toulouse et CNRS)

Jean-François Lavignon (BULL)

Eric Moulines (Télécom ParisTech)

Jean Roman (Inria)

Interactions des mondes physiques, de l'humain et du monde numérique:

Responsables :

Michel Beaudoin Lafon (Université d'Orsay)

Danièle Pelé (Orange)

Membres :

Jean-Marc Brossier (Grenoble INP)

Raja Chatila (CNRS)

Hervé Fanet (CEA)

Jean-Pierre Fourcade (La Poste)

Olivier Guetta (Renault)

Catherine Pélachaud (CNRS et Télécom ParisTech)

Le numérique au service de la qualité de vie:

Responsables :

Jacques Guichard (Systematic)

David Sadek (Institut Mines-Télécom)

Membres :

Patrick Boisseau (CEA)
Christian Jutten (Grenoble INP et CNRS)
Christophe Lorieux (SANTECH)
Joël Mercelat (Delta Dore)
Lotfi Senhadji (Université de Rennes 1)
Monique Thonnat (Inria)

Réseaux numériques à haute performance:

Responsables :

Thierry Houdoin (Orange)
Daniel Kofman (Télécom ParisTech)

Membres :

Frédéric Desprez (Inria)
Frédéric Dulac (Eolas)
Gérard Faria (Teamcast)
Lionel Rudant (CEA)
Cesar Viho (Université de Rennes 1)

Maitrise des composants nanoélectroniques et nanophotoniques:

Responsables :

Erick Lansard (Thales)
Marie Noelle Séméria (CEA)

Membres :

Pascal Besnard (ENSSAT)
Richard Fournel (ST Micro)
Michel Renovell (CNRS)
Bruno Thedrez (Télécom ParisTech)

Groupes de travail Allistene – Alliances

Allistene - Allenvi, numérique et environnement

Responsables :

Frédéric Garcia, INRA, (Allenvi)
Jérôme Mars, Grenoble INP, (Allistene)

Membres :

Pierre Auger, IRD, (Allenvi)
Daniel Barthélémy, CIRAD, (Allenvi)
Jean-Louis Dufresne, CNRS, (Allenvi)
Cédric Gossart, Télécom Ecole de Management, (Allistene)
Vivien Mallet, Inria, (Allistene)

Olivier Marti, CEA, (Allenvi)
Cyril Moulin, CEA, (Allistene)
Guillaume Pépin, ANDRA, (Allenvi)
Hélène Touzet, CNRS, (Allistene)

Allistene - Ancre, numérique et énergie

Responsables :

Gérard Memmi, Télécom ParisTech, (Allistene)
Nicole Mermilliod, CEA, (Ancre)

Membres :

Brigitte d'Andréa-Novel, Ecole des Mines Paristech, (Allistene)
Joseph -Frédéric Bonnans, Inria (Allistene)
Alain Dollet, CNRS, (Ancre)
Patrick Reignier, Grenoble INP, (Allistene)
Yves Samson, CEA, (Allistene)

Allistene - Athena, numérique et sciences humaines et sociales

Responsables :

Dominique Boullier, IEP Paris, (Athéna)
Christian Licoppe, Télécom ParisTech, (Allistene)

Membres :

Catherine Garbay, CNRS, (Athéna)
Hervé Isar, Université d'Aix-Marseille, (Allistene)
Daniel Le Métayer, Inria, (Allistene)
Franck Multon, Université Rennes 2, (Athéna)
Pierre Musso, Telecom Paris-tech, (Athéna)
Sophie Pene, Université Paris Descartes (Athéna)
Isabelle Tellier, Université de Paris 3, (Allistene)

Allistene - Aviesan, numérique et santé

Responsables :

Jacques Grassi, CEA, (Aviesan)
Alain Viari, Inria (Allistene)

Membres :

Philippe Cinquin, Université Joseph Fourier, Grenoble, (Allistene)
Thierry Grange, CNRS, (Aviesan)
Frank Lethimonnier, CEA, (Allistene et Aviesan)
Christian Roux, Télécom Bretagne, (Allistene)
Hélène Touzet, CNRS, (Allistene)