

HUB Digital Engineering

Feuille de route

Edition 2020

Table des matières

1	Introduction	6
2	Vision stratégique	7
2.1	LES SYSTEMES COMPLEXES DU FUTUR	7
2.2	LA TRANSFORMATION NUMERIQUE.....	8
2.3	DOMAINES D'APPLICATION.....	9
2.4	LA MISSION DU HUB DIGITAL ENGINEERING	9
3	Axes de la feuille de route	12
3.1	SIMULATION NUMERIQUE ET OPTIMISATION.....	14
3.1.1	<i>Périmètre technique - généralités</i>	14
3.1.2	<i>Périmètre technique détaillé</i>	17
3.1.2.1	Fidélité de la simulation	17
3.1.2.2	Efficacité et performance de la simulation	19
3.1.2.3	Interface avec le cycle de vie des produits	21
3.2	CALCUL HAUTE PERFORMANCE (HPC)	22
3.2.1	<i>Périmètre technique - généralités</i>	22
3.2.2	<i>Périmètre technique détaillé</i>	23
3.2.2.1	Infrastructures : Architectures HPC	24
3.2.2.2	Infrastructures : Architecture HPC embarquée	25
3.2.2.3	Modèles de programmation, langages, middlewares et outils de parallélisation	25
3.2.2.4	Bibliothèques scientifiques	25
3.2.2.5	Modèles complexes hybrides.....	25

3.2.2.6	Logiciels applicatifs.....	26
3.2.3	<i>Partenariats.....</i>	26
3.3	QUANTUM.....	27
3.3.1	<i>Périmètre technique – Généralités</i>	27
3.3.2	<i>Périmètre technique détaillé.....</i>	28
3.3.2.1	Calcul quantique adiabatique	28
3.3.2.2	Architecture de calcul à qubits physiques (NISQ)	29
3.3.2.3	Architecture de calcul à qubits logiques (QEC).....	30
3.3.3	<i>Les applications du calcul quantiques.....</i>	30
3.3.4	<i>Orientations techniques & stratégiques</i>	31
3.3.4.1	Vision stratégique.....	31
3.3.4.2	Priorités stratégiques	32
3.3.4.3	Verrous technologiques	32
3.3.4.4	Priorités à l'élargissement de l'écosystème.....	32
3.3.5	<i>Les acteurs en Ile de France</i>	32
3.4	INGENIERIE SYSTEME ET LOGICIEL.....	33
3.4.1	<i>Périmètre technique - Généralités.....</i>	33
3.4.2	<i>Périmètre technique détaillé.....</i>	35
3.4.2.1	Vers un déploiement industriel	35
3.4.2.2	Vers de nouveaux paradigmes	37
3.4.2.3	L'accélération de l'ingénierie système	39
3.5	TRANSITION NUMERIQUE.....	40
3.5.1	<i>Périmètre technique – Généralités</i>	40
3.5.2	<i>Périmètre technique détaillé.....</i>	41
3.5.2.1	Accélération et fiabilité des processus d'innovation.....	41
3.5.2.2	Agilité des modèles d'organisation.....	42

4	Missions et mise en œuvre.....	44
4.1	GOUVERNANCE DU HUB DIGITAL ENGINEERING	44
4.2	VEILLE STRATEGIQUE	47
4.3	BILAN TECHNO & BUSINESS.....	47
4.4	ACCOMPAGNEMENT AU PIVOT TECHNIQUE OU BUSINESS.....	48
4.5	SUPPORT AU DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE OU BUSINESS.....	48
4.5.1	<i>Mise en relation</i>	<i>48</i>
4.5.2	<i>Animation de la R&D Collaborative</i>	<i>48</i>
4.5.3	<i>Accélération des opérations business : Accès au marché / Finance / Visibilité</i>	<i>49</i>
4.5.4	<i>Formation et Recrutement.....</i>	<i>49</i>
4.5.5	<i>Gestion du changement</i>	<i>50</i>

Mot du Président du HUB Digital Engineering

Les systèmes dont nous faisons usage en tant qu'individu ou professionnel bénéficient en permanence d'innovations technologiques qui redessinent les usages, les métiers, nos modes de consommation, et modes de vie. Ils ont un impact majeur sur nos capacités à agir et à décider ; ils décalent nos modes de consommation vers l'usage au détriment de la possession. Ils portent des potentialités de transformation et d'optimisation dans les entreprises plus profondes que les capacités naturelles d'adaptation de celles-ci ne le permettent. Le terme « transformation numérique » rend compte de ces enjeux.

Face à cette accélération et dans la compétition internationale actuelle, l'agilité des entreprises devient la qualité déterminante nécessaire au développement et à la survie de celles-ci ; seules celles capables de remettre en cause à rythme soutenu le statu quo en termes d'offre et d'organisation survivront.

Le Hub Digital Engineering dispose d'une position unique. Il porte un œil sur l'ensemble du spectre des technologies du numérique, mais surtout traite des fondamentaux sur lesquels ces technologies sont bâties. Il permet de se projeter sur les futures ruptures et d'imaginer leurs potentialités. Ces fondamentaux sont les méthodes, outils et infrastructures numériques profondes support au déploiement et à l'exécution des systèmes.

La mission du Hub Digital Engineering consiste à favoriser le développement des technologies en amenant les fournisseurs de technologies au meilleur niveau d'excellence, mais elle consiste aussi à supporter les entreprises dans l'appropriation de ces technologies au bénéfice de leur développement économique ce qui signifie nouvelles propositions de valeurs et nouveaux modèles d'affaire.

Pour assurer cette mission, notre Hub rassemble les principaux acteurs technologiques européens de l'écosystème, ainsi que les acteurs du support à la transition numérique, permettant maximiser la création de valeur dans le domaine du numérique tout en accompagnant les transformations.

Les chiffres du HUB Digital Engineering

Le Hub Digital Engineering s'inscrit dans la continuité des phases précédentes du pôle de compétitivité où les chiffres clés de notre périmètre étaient les suivants :

- 202 projets de R&D financés pour un cout total de R&D de 1 106 M€ incluant 401 M€ d'aides publiques.
- Un écosystème de 169 partenaires dont 61 PME, 5 ETI, 42 grands groupes et 61 instituts de recherches et universités.

1 Introduction

Ce document traite de la feuille de route publique (roadmap) reflétant la vision stratégique du Hub Digital Engineering.

Cette vision stratégique se décline en plusieurs thèmes :

- Le thème technologique : Nous décrivons ici le périmètre technologique du Hub en cohérence avec une vision unifiante de ce que seront les systèmes complexes futurs.
- Le champ des actions que nous définissons à notre niveau pour contribuer à la mission que le pôle Systematic s'est défini pour la phase 4.

2 Vision stratégique

2.1 Les systèmes complexes du futur

La cause profonde de l'évolution des systèmes est fondamentalement liée à l'apparition d'infrastructures de communication ubiquitaires constituées de l'internet ou des nouveaux réseaux dédiés aux objets connectés. Par exemple, le traitement des données massives n'est permis que grâce à ces infrastructures de même que les applications mobiles s'appuient sur la disponibilité des réseaux. Par ailleurs, les possibilités d'apprentissage ne sont possibles que grâce à l'existence d'un accès aux données massives. La capture, le traitement et l'élaboration des connaissances peut s'effectuer en temps réel avec un rebouclage possible, constitué de la production quasi instantanée de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux comportements systèmes issus de cette connaissance.

L'évolution structurante aujourd'hui vient du continuum physique / virtuel qui est en train de s'établir du fait de l'émergence de l'IOT. Le continuum est constitué de l'IOT, des technologies de collecte de données, de l'extraction automatisée de connaissance et de la présentation ou prise de décision grâce à l'émergence de l'IA.

Cette intégration / interconnexion de plus en plus large des systèmes, accélère progressivement le cycle *déploiement* → *extraction de connaissance* → *évolution*. On peut citer deux exemples illustrant ce phénomène : le jumeau numérique et l'intégration IT/OT.

- Le Jumeau Numérique permet la capture de données de comportement d'objets ou de systèmes afin de mesurer en temps réel l'écart de leur comportement à un modèle de référence. Cette connaissance acquise en ligne permet d'anticiper les défaillances à venir ou bien de lancer en avance de phase des actions de conception correctives.
- L'IT (technologies de l'information) supporte les Systèmes d'Information d'Entreprise alors que l'OT (Operational Technology) a en charge les SII (Systèmes d'Information Industriels) support à l'exploitation. Grâce à l'internet des objets et aux infrastructures numériques, la convergence IT / OT permet de croiser en temps réel, les données remontées des opérations (consommation électrique, métriques de production...) et les données issues des systèmes de gestion et ainsi adapter la stratégie (commerciale, marketing) en utilisant la connaissance générée par ces systèmes en quasi temps réel.

On dispose à présent d'une connaissance issue d'un système composé à la fois de son incarnation physique, de données issues de son fonctionnement, et de données issues de ses utilisateurs. Cette connaissance est consommée à de multiples niveaux dans l'entreprise pour adapter la stratégie de conception de celui-ci.

Le maillon le plus lent dans ce workflow est l'être humain qui va devoir mener les études techniques (conception système), marketing (scoping marché), etc.

La vision du Hub Digital Engineering est que l'intégration des systèmes va se poursuivre et que la frontière entre extraction de données, production de connaissance et ingénierie va s'estomper. On assiste d'ailleurs à des événements avant-coureurs de ce phénomène : Par exemple, la tombée en désuétude des processus de conception *top down* assorti de leur inévitable effet tunnel au profit d'approches agiles et ou de type prototypage rapide qui permettent de confronter plus rapidement le système produit à son futur environnement. Ce phénomène témoigne à la fois du besoin d'accélération et de collecte de l'information terrain.

De manière plus précise, cette évolution, au-delà des thématiques d'engineering connues va donc générer :

- Une accélération des processus de développement et d'évolution des systèmes,
- L'accélération de l'émergence de nouvelles propositions de valeur diminuant de fait la durée d'un business model rentable construit sur les précédentes propositions de valeur,

Et donc aura pour effet,

- L'atténuation de la frontière entre système opérationnel et ingénierie,
- Une redéfinition de la discipline de gestion des exigences et plus généralement de la gestion des besoins,
- Une prise en compte du marché dans le processus de conception avec une interaction plus étroite entre fonctions business et techniques,
- La poursuite du développement des infrastructures de calcul support au traitement des modèles et des données distribuées (edge computing etc.),
- La poursuite du développement des technologies de simulation,
- L'irruption des technologies de rupture de type IA dans le champ de la conception.

2.2 La transformation numérique

La transformation digitale, parfois appelée transformation numérique, désigne le processus qui consiste, pour une organisation, à intégrer pleinement l'impact des technologies digitales dans l'ensemble de ses activités. Au-delà de l'usage des technologies digitales dans l'activité de l'entreprise à des fins d'amélioration ou d'optimisation des processus existant, il s'agit d'exploiter les potentialités offertes par ces technologies dans le développement de nouvelles offres, de nouveaux modèles d'affaire ou de construction de nouvelles chaînes de valeur. La transformation

numérique est transformationnelle jusqu'à l'identité de l'entreprise elle-même. En ce sens, la transformation numérique possède un caractère radical. La vision des systèmes complexes du futur, présentée au chapitre précédent constitue le socle technologique sur lequel ces transformations vont se construire.

2.3 Domaines d'application

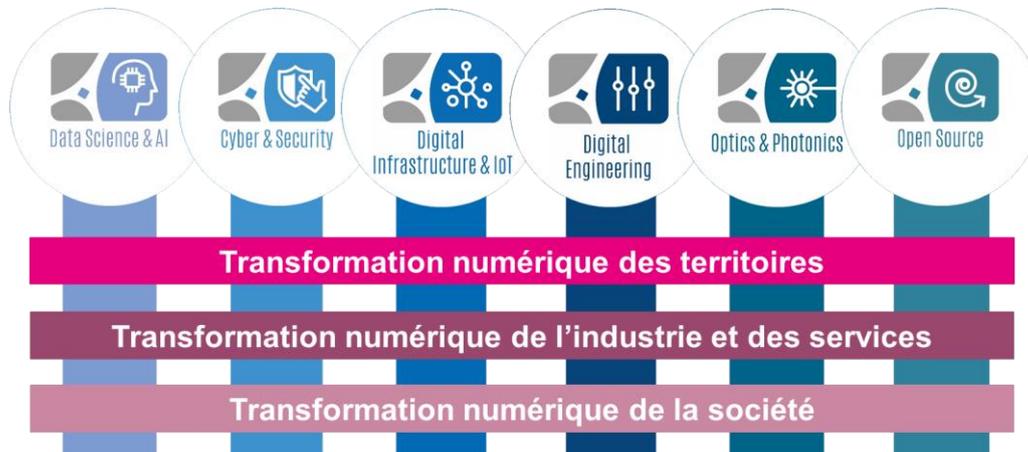
D'une manière générale, les solutions techniques (composants, architectures, ingénierie) soutenues par le Hub Digital Engineering ont vocation à être mises en œuvre dans tous les domaines d'application du périmètre du pôle. Nous citerons à titre d'exemple :

- Les infrastructures critiques ;
- La production et la maintenance des biens matériels (industrie 4.0, Jumeau Numérique, maintenance prédictive etc.);
- Les dispositifs médicaux (à domicile, en milieu hospitalier), en matière de prévention, diagnostic, traitement ;
- La production, la distribution et la gestion de l'énergie ;
- Les transports – infrastructures et véhicules (mobilité individuelle, véhicule autonome, automobile, ferroviaire, aéronautique, espace) ;
- La ville intelligente (surveillance, aide aux usagers des transports et des équipements collectifs) ;
- La gestion de la communication, de la sécurité et de l'énergie au domicile (domotique) ;
- Les systèmes de paiement ;
- L'agriculture ;
- Les jeux et les loisirs ;
- La biologie et la chimie, etc.

2.4 La mission du Hub Digital Engineering

La vision stratégique du Hub Digital Engineering s'inscrit dans la nouvelle organisation du pôle Systematic redéfinie à l'occasion de l'élaboration du contrat pluriannuel signé avec l'état.

Les activités du pôle sont structurées conformément à une segmentation de l'écosystème représentée ci-dessous.



Cet écosystème comporte :

- 6 axes technologiques nommés « Hubs ».
- 3 axes orientés usage, transverses au 6 Hubs technologiques nommés « Enjeux ».

Les Hubs s'orientent principalement vers le soutien au développement d'un écosystème technologique ; logiquement constitué principalement de technos providers et de sociétés de conseil technologique.

Les Enjeux s'orientent principalement vers le soutien au développement d'usages tirant bénéfice des technologies issues des 6 Hubs technologiques.

Pour faire simple et sans doute un peu caricatural, les Hubs adaptent plutôt une approche « techno push », alors que les enjeux sont plutôt « business pull ».

Cette structuration générale doit être complétée pour le Hub Digital Engineering : L'ingénierie est intimement liée aux technologies elles-mêmes. Chaque nouvelle technologie apporte son lot d'enjeux en termes d'ingénierie. Par exemple, comment valider des réseaux neuronaux dont le comportement dépend essentiellement des données d'apprentissage ? Il est nécessaire de considérer le Hub Digital Engineering comme transverse aux autres Hubs du pôle. Il est par ailleurs indispensable de définir le périmètre technique du Hub. Les domaines de l'ingénierie ne cessent de s'étendre et il est indispensable d'en préciser les bornes, le contenu et les domaines dans lesquels des challenges sont à relever.

La mission générique du pôle et du Hub Digital Engineering est de « développer et animer un écosystème d'excellence internationale ».

Cette mission ne peut se concevoir sans prospective active permettant de développer l'écosystème en direction des technologies et usages futur les plus probables. On attendra donc du Hub Digital Engineering de formuler une vision initiale dans ce document et de la cultiver au cours du temps en assurant une activité de réflexion et de veille sur les thèmes suivants :

- Quelle émergence de futures classes de systèmes permises par les ruptures technologiques ?
- Quelles attentes sociétales / environnementales ?
- Quels impacts en termes de ruptures des modèles économiques et de chaînes de valeur ?
- Quels impacts en termes de conception ?

Cette mission se décline en sept axes stratégiques, de même type pour les 6 Hubs du pôle. La figure suivante représente ces sept axes stratégiques :



3 Axes de la feuille de route

Parce qu'il offre une formidable opportunité de gain de compétitivité pour les industriels, le concept de Jumeau Numérique se diffuse aujourd'hui dans l'ensemble des secteurs industriels pour permettre, au-delà la conception optimale d'un produit, sa maintenance prédictive ou son optimisation de fonctionnement.

En phase de développement d'un produit, au lieu de créer un objet et de le tester pour ensuite y apporter des améliorations, le Jumeau Numérique permet une comparaison continue avec l'objet ou produit cible pendant sa construction. Cela conforte plus rapidement son bon déroulement, et les bons choix en matière d'ergonomie, de matière et de design.

Et, surtout, après la création d'un produit, l'un des défis importants des industriels réside dans la maintenance prédictive. Et sur ce point, le Jumeau Numérique aide à comprendre, anticiper et optimiser les performances d'un produit : en ajoutant, via des capteurs, des données de contrôle de la performance, le Jumeau Numérique permet de mener des analyses et d'identifier en amont un risque de défaillance.

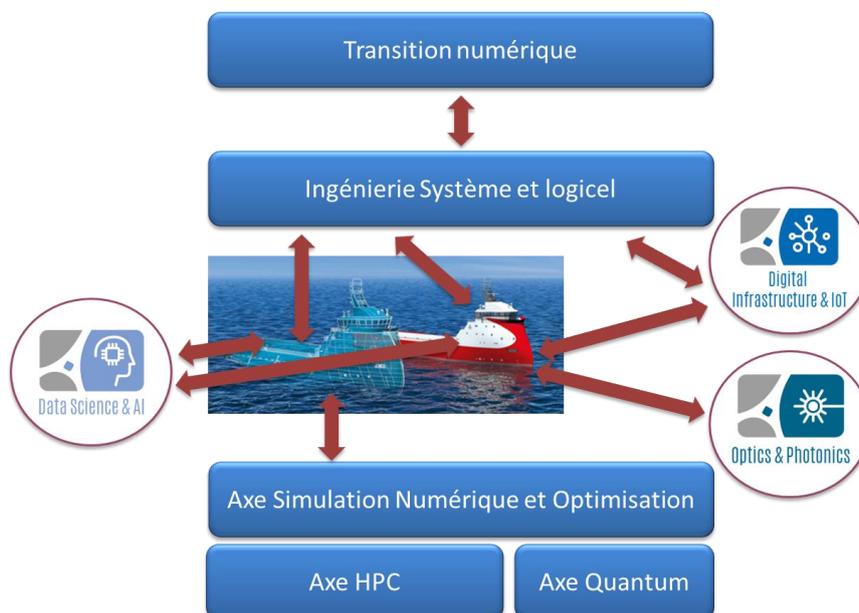
Ce concept, qui emploie très largement les technologies portées par le HUB Digital Engineering, n'est pas nouveau. Il prend forme progressivement avec :

- D'une part, la maturité de l'ingénierie système et logiciel, de la modélisation et simulation numérique et des puissances de calcul, permettant d'appréhender des systèmes, voire système de systèmes, de plus en plus complexes ;
- Et d'autre part, l'apport de technologies complémentaires telles que l'internet des objets, la maturité d'autres technologies telles que l'IA, permettant une interaction continue avec le « modèle numérique », pendant la phase de développement, et entre le « modèle numérique » et le produit pendant la vie du produit.

Ce Jumeau Numérique, constitue le fil conducteur des 5 axes de la feuille de route du Hub Digital Engineering. Des collaborations étroites seront de plus nécessaires avec les autres HUB pour notamment coordonner les travaux et résultats relatifs aux IOT et à l'IA avec ceux du Hub Digital Engineering pour porter l'innovation dans ce domaine.

Les 5 axes identifiés sont définis par le périmètre qu'ils sont censés couvrir : des infrastructures d'exécution jusqu'à l'exploitation des opportunités Business générés par ce paradigme :

- Axe N°1 : Infrastructure d'exécution haute performance répondant aux besoins de puissance de calcul des jumeaux numériques et des besoins spécifiques de ceux-ci : contraintes temps-réel ou sûreté de fonctionnement.
- Axe N°2 : Quantum computing ; c'est une rupture technologique majeure dont les conséquences en termes de capacité de calcul et de développement d'applicatif sont encore difficiles à cerner. Il convient donc d'intégrer dès à présent cette rupture en tant qu'axe à part entière.
- Axe N°3 : Simulation et Optimisation. On touche ici aux modèles numériques eux-mêmes du Jumeau Numérique sous toutes ses formes : logicielles, physiques, systèmes etc.
- Axe N°4 : Ingénierie Système et Logiciel. Cet axe concerne les capacités de conception des Jumeau Numérique intégrant par ailleurs l'usage de données de capture in-situ du système physique et consommées dans le processus de conception.
- Axe N°5 : Transition numérique. Le déploiement de solutions Jumeau Numérique s'accompagne de potentialités majeures à l'intérieur des entreprises en imposant une réflexion sur la redéfinition des Business Process et des métiers. Il impose aussi cette réflexion à l'extérieur des entreprises en libérant un potentiel d'innovation de business model.



Les chapitres suivants présentent pour chaque axe les différents axes technologiques les composants et les partenariats établis avec les institutions permettant de développer l'écosystème et les technologies plus rapidement et plus efficacement.

3.1 Simulation numérique et optimisation

3.1.1 Périmètre technique - généralités

La Simulation se définit comme un outil à la fois scientifique et informatique qui permet l'exploitation d'une représentation virtuelle - ou modèle - du comportement d'un objet, d'un système, d'un phénomène, d'un processus industriel ou d'une organisation. La mise en œuvre de ces modèles par la simulation a généralement pour but d'analyser et comprendre le fonctionnement de systèmes complexes, de façon à prévoir et contrôler leur comportement dans tout son cycle de vie. Elle présente de nombreux atouts ; d'ordre économique tout d'abord car elle permet d'avoir une meilleure réactivité, une meilleure capacité d'anticipation et d'apporter des gains de compétitivité.

Le Hub Digital Engineering vise le développement de technologies de simulation et d'optimisation directement utiles aux industries :

- Automobile, aéronautique, énergie, biologie, chimie...
- Au-delà de ces domaines traditionnels des industries manufacturières, le développement rapide des nouveaux marchés de service, portés par la maturité de l'économie numérique, constitue une extension naturelle de l'usage de la simulation. C'est en particulier le cas pour :
 - Les secteurs comme la banque et des finances,
 - Les sciences humaines : démographie, sociologie...
 - Les domaines de la sûreté et de la sécurité (exploration et compréhension des situations accidentelles potentielles).

Au niveau des secteurs industriels, la simulation numérique est un élément indispensable à la maîtrise d'architectures complexes tout au long de leur cycle de vie, depuis les phases amont de convergence des exigences jusqu'au retrait de service et au recyclage. De fait, elle est aujourd'hui un élément important du PLM étendu, qui est vecteur de la filière « end to end » conception, fabrication, support en service, retrait de service et recyclage.

Modélisation et simulation vont toujours de pair. L'analyse critique des résultats, la comparaison avec des études théoriques ou expérimentales permet une amélioration des modèles sous-jacents, de leurs paramètres et des programmes informatiques de simulation. Lorsque les modèles ont été vérifiés comme prédictifs, la simulation donne une nouvelle prise sur le réel en permettant d'anticiper le comportement d'un système dans des configurations inédites.

La simulation a cependant des limites :

- La compréhension de certains phénomènes est encore aujourd'hui mal maîtrisée rendant ainsi difficile leur modélisation.
- Certains modèles pour être prédictifs nécessitent une puissance de calcul non encore disponible aujourd'hui.
- Certains systèmes sont d'une complexité telle que leur simulation « en bloc » n'est pas encore envisageable.

Il est important de noter que les caractéristiques d'une « bonne simulation » varient beaucoup avec les objectifs poursuivis (de la modélisation fine à l'analyse qualitative), les connaissances a priori sur le système (du modèle mathématique détaillé à un simple échantillonnage d'états), les conditions pratiques de son exploitation (du mainframe à la tablette), etc. Si les efforts pour simuler plus et mieux ne datent certes pas d'hier, ils rencontrent constamment de nouveaux défis à relever dans un monde en pleine évolution technologique. Il n'est en particulier pas étonnant que le sujet « Simulation » croise tous les autres axes de la feuille de route du Hub Digital Engineering :

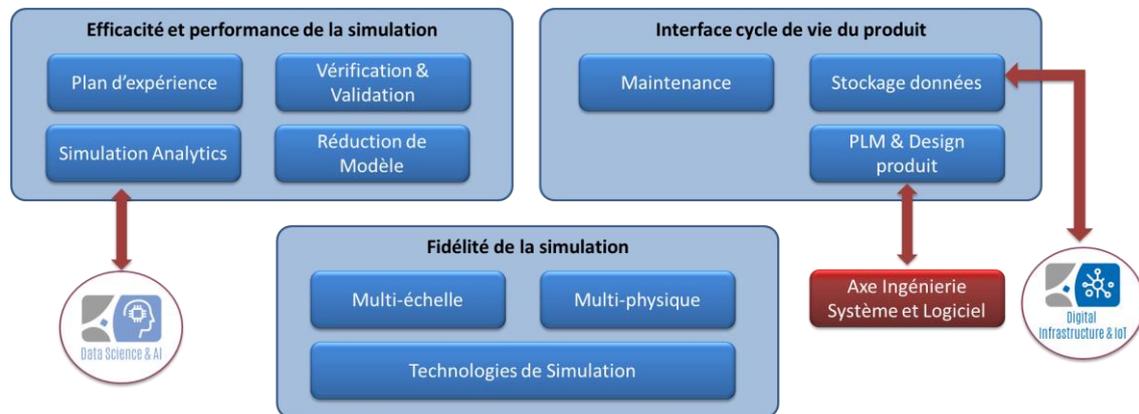
- Le Quantum Computing, innovation capable, non seulement d'augmenter considérablement la rapidité de traitement des données sur certaines opérations complexes pour un ordinateur classique par résolution de problèmes de combinatoire, mais également de prédire et simuler certains processus naturels.
- Le HPC, dont les outils et méthodes permettent d'exploiter au mieux des architectures matérielles puissantes, capables d'accélérer les simulations dans un contexte de changement des architectures des calculateurs, poussé notamment par une réduction nécessaire de la consommation énergétique.
- L'ingénierie Système et logicielle, interface entre les mathématiques appliquées, l'informatique, la recherche opérationnelle, la mécanique, l'automatique, l'économie, le pilotage et la gestion des outils de conception et de production mais aussi ponts entre modélisation, simulation numérique, conception, pilotage et optimisation de systèmes sociotechniques pour l'industrie et les services.

Pour finir, la Simulation numérique est le point d'orgue à la conduite du changement et la transformation numérique de la Société. On voit apparaître une accélération forte de la transformation de l'information en données immatérielles. Les imbrications de données convoquées par les NBIC (Nanotechnologie, biologie, informatique et sciences cognitives) nous laissent entrevoir l'étendue des changements qui vont avoir lieu dans de nombreux domaines de l'activité humaine.

Le pôle Systematic et plus particulièrement le Hub Digital Engineering soutient les projets collaboratifs visant à développer toute solution de simulation et d'optimisation. Sans être exhaustif, on peut citer :

- L'amélioration des technologies de simulation et d'optimisation dans leurs secteurs applicatifs historiques telle que la conception de structures complexes, de produits et de procédés. Cette amélioration passe désormais par un lien avec l'ingénierie système, la gestion des exigences ou encore le développement de processus industriels et de systèmes de production ;
- La prise en compte de l'extrême disparité des échelles aussi bien spatiales que temporelles et fréquentielles : de l'automate cellulaire au méga-code éléments finis, du plus petit comme un point de soudure à l'avion complet, du composant au réseau, etc.;
- Les démarches de réduction de modèles, d'optimisation algorithmique, de mise en œuvre de plans d'expérience numériques ou encore de vérification et validation des simulations ;
- Le développement de nouvelles applications de la modélisation et la simulation, notamment à des domaines comme la ville et l'urbain, la santé, le biomédical et la pharmacocinétique, le climat et l'environnement, etc. ;
- La prise en compte de l'embarqué, du temps réel et l'exploitation de ressources de calcul limitées pour livrer des résultats dont la fiabilité et la robustesse doivent répondre à des exigences très strictes, dans des délais contraints ;
- Une meilleure exploitation et une consolidation de résultats de calcul et d'analyse en connexion forte avec les problématiques de l'IA (faisant l'objet d'une autre feuille de route) en amont et en aval ;
- Les méthodologies et outils associés qui facilitent la démocratisation de l'usage de la simulation sans compromis sur la fiabilité de son usage et des résultats qu'elle produit, essentielle au développement du Jumeau Numérique et nécessaire à la prise en compte de la maintenance prédictive.

La simulation numérique se trouve au cœur d'une cartographie riche et complexe représentée dans le schéma suivant :



Le périmètre technique est très large. Dans les pages suivantes, il est structuré, schématiquement, selon 3 thèmes suivants :

1. Fidélité de la simulation : Représentativité spécifique et générique des modèles avec les approches multi-physiques, multi-échelles ainsi que les techniques de réduction de modèle,
2. Efficacité et performance de la simulation : Conception optimale des modèles numériques, la fiabilité,
3. Interface avec le cycle de vie des produits : Depuis la naissance du produit avec les outils d'aide à la décision, le lien avec le PLM, la maintenance prédictive, le jumeau numérique.

Cette structuration guide la présentation du périmètre détaillé.

3.1.2 Périmètre technique détaillé

3.1.2.1 Fidélité de la simulation

Contexte et enjeux

Il convient de rechercher des voies d'amélioration pour des simulations plus performantes : Comportement des matériaux, Modèles multi-échelles, Couplage multi-physique, Simulation des procédés de fabrication... On notera un intérêt émergent pour le concept de « chaînes de simulation » : 1) génération du modèle de calcul (simplification géométriques, réalisation des maillages,) ; 2) mise en données du problème (conditions aux limites, paramètres algorithmiques...) ; 3) mise en machine du calcul (découpage, partitionnement de domaines,...) ; 4) Résolution du problème (avec un lien fort vers le HPC) ; 5) Analyse et gestion des résultats ; 6) Traitement des

données en grand nombre avec des algorithmes de Machine Learning. Un autre point d'intérêt se situe au niveau des modèles de simulation : modèles mathématiques représentant les physiques considérées ; modèles numériques : discrétisation adaptée du modèle mathématique pour permettre sa résolution sur ordinateur. Et pour finir les modèles d'ordre réduit basés sur des algorithmiques en réduction dimensionnelle tels que POD (Proper Orthogonal Decomposition) et PGD (Proper Generalized Decomposition) suscitent un intérêt croissant pour l'accès aux résultats de simulations en temps réel.

Problématique et défis techniques

Un premier défi porte sur l'amélioration des simulations avec une meilleure maîtrise de la chaîne de simulation, la disponibilité de modèles plus représentatifs, et une meilleure qualité de la solution numérique. En termes de performances de la simulation, on notera un focus sur la précision / qualité de prédiction, le temps de retour de la simulation (en vision end to end de la chaîne), l'ouverture vers de nouveaux modèles mathématiques : aléatoire, ... Si on s'intéresse à des modèles plus représentatifs, il convient de diminuer les simplifications dans les modèles : modèles plus non linéaires, modèles plus raides. En général cela conduit à des équations plus difficiles à résoudre nécessitant des méthodes numériques adaptées. Il faut également prendre en compte plus de physique dans les modèles et avoir une meilleure maîtrise de l'approximation numérique.

La simulation multi-échelle est une approche de R&D relativement récente. Elle consiste à simuler chaque phénomène à l'échelle de temps et d'espace la plus pertinente. La superposition de ces échelles offre à la fois une vue globale du système, la possibilité de zoomer sur des zones particulières et de prédire le comportement du système sur différentes périodes de temps. Les phénomènes physiques peuvent être d'échelles spatiales et temporelles très différentes. Des techniques de changement d'échelles pour passer de la simulation locale à la simulation globale sont à développer.

Le fonctionnement de la plupart des produits et systèmes complexes met en jeu des interactions entre différentes disciplines physiques. Il est nécessaire de modéliser ces interactions pour prévoir la réponse du produit. Le(s) solveur(s) numérique(s) doit(vent) résoudre les différentes physiques et leur couplage : stratégie de coupleur de codes mono-physique (permet une réutilisation des codes patrimoniaux), solveur contenant tout ou partie des physiques nécessaires, enjeu pour limiter le nombre de couplage nécessaires (efficacité) augmenter le nombre de physiques considérées (généralité). De telles simulations sont plus complexes que les simulations "mono-physiques" habituelles, et ce pour deux raisons :

- Les interactions entre phénomènes doivent être modélisées, ce qui conduit à des couplages entre les différentes physiques (un couplage est un modèle d'interaction) ;
- Les solveurs doivent gérer les différentes physiques (ce qui n'est pas toujours réalisable au sein d'un même solveur) et, de surcroît, prendre en compte les couplages.

La modélisation de systèmes complexes met en lumière la difficulté de garantir répétition, groupe témoin et carte d'identité des modèles. La modélisation et la simulation système font appel à un besoin de synthèse intégrative : aucun ensemble de perspectives disciplinaires ne peut les recouvrir. Simuler un système complexe consiste à modéliser ses constituants, leurs comportements et les interactions entre ceux-ci et avec leur environnement, puis à exécuter numériquement le modèle obtenu. Une des caractéristiques de ces systèmes est que l'on ne peut prévoir l'évolution du système modélisé sans passer par cette phase de simulation. Un des défis de la simulation est de considérer et modéliser le produit ou système dans son environnement d'utilisation : système complet lui-même ou bien un de ses sous-systèmes.

3.1.2.2 Efficacité et performance de la simulation

Contexte et enjeux

On sait élaborer des modèles permettant la simulation prédictive de très nombreux phénomènes, mais sous des conditions de ressources (taille mémoire, temps de calcul) qui limitent le déploiement de nouvelles stratégies d'exploitation de la simulation, en particulier dans des contextes comme :

- La conception optimale : l'exploration de domaines de plus en plus riches, la robustesse de la conception, fiabilité le lien entre produit et process nécessitent de très nombreux calculs comportementaux dans un temps limité.
- La modélisation système : l'emboîtement des niveaux de modélisation requiert la simulation synchrone de composants éventuellement complexes, éventuellement à des cadences compatibles avec la bande passante de capteurs et actionneurs physiques (bancs d'essai hybrides, contrôle embarqué).
- Les données manquantes, soit indisponibles (calculs de pré-dimensionnement, en amont de la chaîne de conception), soit inaccessibles (constantes dans la chimie des systèmes biologiques, ou en combustion), etc.

Problématique et défis techniques

Les outils et méthodes du HPC, qui font progresser les performances des infrastructures matérielles et des modèles de programmation qui y sont associés, sont essentiels, mais ne répondent pas à toutes les attentes. Il faut pouvoir maîtriser la construction de modèles dont la simulation exige peu de ressources mais assure néanmoins la fidélité exigée par chaque type de problématique.

Il existe trois principales voies d'obtention de modèles allégés :

1. La voie formelle : à partir d'un modèle mathématique précis, différentes stratégies de réduction formelle de complexité sont possibles (réduction d'ordre, base réduite, condensation, etc.)
2. La voie phénoménologique : en l'absence de connaissance précise de la structure causale d'un système, on peut sous certaines conditions induire sa réponse à partir d'une collection de réponses de référence, à l'aide de méthodes d'analyse de données (statistiques, reconnaissance de motifs, analyse de Sobol, etc.) en s'appuyant éventuellement sur des « ontologies » (a priori, ou dérivées de corrélations constatées).
3. La voie empirico-expérimentale : c'est une situation intermédiaire, où l'on dispose d'une structure du modèle, mais où les paramètres qui permettent de l'exploiter doivent être identifiés de façon empirique (snapshots, méthodes statistiques, fouille de données, etc.).

Dans ces trois approches, qui peuvent évidemment concourir dans un même modèle de simulation, des avancées importantes sont souhaitables, en poursuivant au minimum les objectifs de :

- Faire progresser les méthodes de réduction formelle pour les systèmes non linéaire (ex : MECASIF).
- Garantir la robustesse des modèles phénoménologiques.
- Développer des méthodes de fouilles de données sur des flux d'entrée en temps réel.
- Caractériser des modèles dont les paramètres sont à priori complexes : prédire les propriétés d'une pièce en fonction des paramètres process de sa fabrication avec un lien fort entre le process et le fonctionnement en service.
- Maîtriser la précision des modèles allégés, leur domaine de validité, la possibilité de les qualifier (systèmes embarqués).
- Développer les stratégies de simulation en réseau très fortement distribués (IoT, etc.), etc.

3.1.2.3 Interface avec le cycle de vie des produits

Contexte et enjeux

L'augmentation régulière des puissances de calcul disponibles permet maintenant d'envisager non plus seulement des simulations unitaires mais aussi des simulations en grappes, où il est possible de faire varier de nombreux paramètres. Ces analyses de tendance permettent alors d'appréhender de manière objective les différentes sources d'incertitude de la simulation et de variabilité du système étudié :

- Sensibilité des modèles aux données d'entrée.
- Variation dans les conditions d'utilisation (chargement ou plus généralement conditions aux limites) des systèmes étudiés.
- Incertitudes ou variabilité dans la définition technique du produit (caractéristiques matériaux, vieillissement, dispersion dans le process de fabrication, maintenance prédictive).
- Apport d'un jumeau numérique.

Globalement l'analyse de tendance consiste à évaluer le gradient de performance du système vis-à-vis de ces différents paramètres et contribuent notamment à renforcer la confiance dans la simulation et garantir les résultats vis-à-vis des exigences en répondant à la question « what if ? ». C'est également un moyen de prendre en compte l'aspect aléatoire de certains paramètres et d'introduire une approche stochastique dans la simulation. Enfin, en inversant les résultats, on peut également aborder la problématique de recalage de modèle, ou dans le dernier cas, envisager un tolérancement objectif et optimisé pour assurer un fonctionnement ou une performance cible pour le système.

Lorsque le gradient de performance est connu, l'étape suivante consiste à explorer l'espace de conception et rechercher l'optimum pour le système en cours de conception. Du point de vue théorique, on recherche les points où le gradient devient nul. Si l'optimisation porte simultanément sur plusieurs paramètres antagonistes, on doit définir alors une fonction d'estime (ou fonction coût) qui traduit le compromis à rechercher entre les différentes performances (par exemple masse /prix de revient / résistance mécanique). L'optimisation peut porter sur de nombreux paramètres de conception y compris la forme et la topologie de l'objet.

L'étape suivante consiste à rechercher la sensibilité minimale des performances aux paramètres de conception ou d'environnement. On parle alors de conception robuste, qui permet de garantir le maintien des performances attendues en anticipant les aléas de fabrication ou d'utilisation et de poser les briques de la maintenance prédictive.

Le jumeau numérique, basé sur la physique des modèles (matériau, procédés, structures et systèmes) s'enrichit à tout instant des données issues des capteurs et permet de réduire les incertitudes et marges théoriques, permettant ainsi une conception plus sûre et optimale.

Enfin, les approches de gestion de données de simulation et d'intégration CAO-Calcul représentent une brique de base nécessaire mais qui doivent être consolidées dans une perspective de PLM étendu où l'ensemble des données sont partagées entre les expertises et les métiers tout en étant largement interopérables tant au niveau des modèles utilisés que des logiciels de simulation et environnements de collaboration multi-acteurs et multi-projets.

Problématique et défis techniques

La mise en œuvre des techniques ci-dessus présente des problématiques spécifiques pour lesquelles des progrès significatifs sont attendus :

- Associativité et automatisation du lien CAO-calcul (analyse isogéométrique, meshless, méthode particulière, ...).
- Gestion des données d'entrée, caractérisation des incertitudes et lien avec une maquette numérique tolérancée et comportementale ; maintenance prédictive.
- Gestion des résultats de simulation en grappe (en lien avec le PLM), visualisation et navigation dans l'espace des résultats (éventuellement en lien avec les Big Data, data mining), réalité virtuelle et augmentée, traçabilité des décisions.
- Simulation Data Management et intégration dans le PLM étendu :
 - Couplage avec les critères et paramètres d'ingénierie des exigences (intégration entre la gestion des exigences, la modélisation 0/1D et la simulation 2D/3D) ;
 - Gestion des comportements complexes et multidisciplinaires dans la maquette numérique de référence (dépendances de données et des modèles) ;
 - Consolidation du référentiel numérique global intégrant les modèles, les documents, les nomenclatures d'exigences, de conception, de calcul, d'industrialisation, de fabrication ou d'exploitation voire de maintenance et de démantèlement ;

3.2 Calcul haute performance (HPC)

3.2.1 Périmètre technique - généralités

La dynamique des technologies HPC repose globalement sur trois points essentiels :

- L'augmentation considérable de la puissance de calcul ; actuellement au niveau du pétaflop, pour atteindre très rapidement l'exaflop (milliard de milliard d'opérations flottantes par seconde). Cette évolution se fait par la généralisation du parallélisme massif et le développement d'architectures hybrides incluant CPU et accélérateurs (GPU, FPGA, quantique, ...).
- De nombreuses évolutions au niveau de l'algorithmique parallèle pour résoudre des problèmes de plus en plus complexes intégrant à la fois des modélisations physiques, le plus souvent couplées et des modélisations par apprentissage des données (intelligence artificielle) .
- Grace à ces deux points, le HPC impacte maintenant tous les secteurs de l'économie (grands secteurs industriels, administration, mais aussi grand public). A côté des secteurs traditionnels, tels l'automobile, l'aéronautique ou l'énergie de nouveaux secteurs utilisateurs importants apparaissent tels la santé, l'agro-alimentaire ou l'environnement.

Cette évolution extrêmement rapide nécessite un effort soutenu et permanent tant au niveau national qu'au niveau européen. Toute action nationale doit se situer en cohérence et en complémentarité des actions européennes, notamment de l'initiative EuroHPC qui vient d'être lancée.

A côté de ces points technologiques, un effort important devra être consenti sur les problématiques suivantes :

- Intégration du HPC dans les grands systèmes d'information, notamment autour des technologies cloud, Edge et IoT.
- Accessibilité des capacités HPC à tous les acteurs de l'économie et notamment les PME et les ETIs.

Afin d'assurer une réponse adéquate aux problèmes d'usage et de garantir une diffusion maximale des résultats, une approche de co-design est essentielle pour l'ensemble de ces actions avec notamment le montage de consortiums regroupant utilisateurs (grands et petits), fournisseurs de technologies (matérielles et logicielles) et intégrateurs, acteurs académiques.

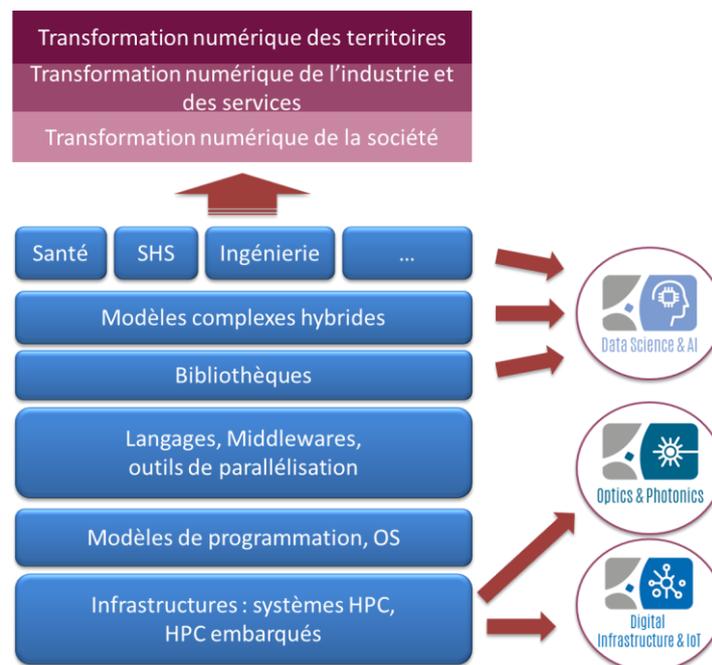
Des actions coordonnées avec les autres hubs sont également indispensables pour couvrir correctement tout le spectre des problématiques et des applications. Des actions communes devront être mise en place en particulier avec le hub data sciences et IA et le hub digital infrastructure et IoT. Par ailleurs des actions coordonnées devront être développées avec les enjeux applicatifs.

3.2.2 Périmètre technique détaillé

L'axe HPC se structure en sous-thématiques couvrant depuis les architectures matérielles jusqu'aux couches logicielles du plus haut niveau donnant accès à la

puissance de calcul de la manière la plus efficace et la plus facile à utiliser pour différentes classes de domaines applicatifs : Santé, Science économiques et sociales etc. Chaque sous thématique peut comporter des adhérences avec d'autres Hubs du pôle :

- Côté infrastructure HPC, des adhérences existent avec :
 - Le Hub Digital Infrastructure et IOT qui traite de composants essentiels du Jumeau Numérique.
 - Le Hub Optics & Photonics qui traite des capteurs qui pourront s'intégrer dans des systèmes Jumeau Numérique.
- Côté bibliothèques et modèles complexes hybrides, des adhérences existent avec le Hub Data science & AI qui sera fournisseur de contraintes algorithmiques pour le développement de bibliothèques de calcul spécialisées.



Cartographie des thématiques de l'axe HPC

De manière plus détaillée, les sous-thématiques à retenir pour les futures actions peuvent porter sur les points suivants.

3.2.2.1 Infrastructures : Architectures HPC

L'étude, la conception et la mise au point des architectures des nouveaux systèmes, notamment exaflopiques, prenant en compte les fortes contraintes énergétiques et les architectures hybrides qui pourront probablement intégrer des systèmes de plus

en plus complexes y compris, à terme des processeurs quantiques (Les problématiques liées au calcul quantique sont abordés dans un groupe spécifique).

3.2.2.2 Infrastructures : Architecture HPC embarquée

L'étude, la conception et la mise au point des architectures haute performance embarquées fortement hétérogènes (SoC) éventuellement reconfigurables (hybrides FPGA), prenant en compte les contraintes temps-réel ou de sûreté de fonctionnement.

3.2.2.3 Modèles de programmation, langages, middlewares et outils de parallélisation

La mise au point d'environnement et de modèles de programmation adaptés à ces nouvelles architectures.

- Un premier point important concerne les problématiques de localisation des données, de gestion et d'optimisation des flux de données, de stockage et d'accessibilité des données.
- Un deuxième point concerne le middleware, à l'interface entre le matériel et les logiciels applicatifs, notamment sur les sujets suivants : gestion de l'accès aux données, allocation dynamique des ressources, maîtrise de l'énergie, virtualisation des ressources, tolérance aux pannes, ...
- Un troisième sujet couvre les modèles de programmation de ces systèmes hybrides. Aucun modèle de programmation ou langage universel ne peut actuellement prendre en compte la complexité croissante des architectures.

3.2.2.4 Bibliothèques scientifiques

Les bibliothèques scientifiques de base sont au cœur des performances pour les futurs logiciels applicatifs, afin d'exploiter au maximum les capacités de traitement parallèle des nouvelles architectures. Des travaux algorithmiques très importants devront être entrepris afin de disposer de bibliothèques scientifiques de base adaptées, notamment dans les domaines suivants : algèbre linéaire, statistique et analyse des données, optimisation, visualisation avec une attention toute particulière sur les outils d'apprentissage par les données et d'intelligence artificielle pour la conception des systèmes complexes.

3.2.2.5 Modèles complexes hybrides

Les travaux s'orientent de plus en plus vers l'étude de systèmes complets de très grande taille qui doivent prendre en compte de manière couplée des types très différents de modèles : modèles mathématiques des phénomènes physiques, modèles de comportement intégrant notamment la modélisation de l'environnement

et des composants type mécatronique et de plus en plus modèles par apprentissage des données comme les réseaux de neurones. Le traitement global d'un tel système nécessite de mettre au point des méthodes numériques nouvelles liées aux caractéristiques très différentes des modèles considérés, méthodes qui devront être adaptées aux nouvelles architectures parallèles et hybrides.

3.2.2.6 Logiciels applicatifs

Le développement des grands logiciels applicatifs d'une part par thématique scientifique (par exemple calcul de structure, mécanique des fluides, électromagnétisme ...) et d'autre part par secteurs applicatifs, en intégrant à côté des secteurs traditionnels, les nouveaux secteurs : santé, biologie, agriculture et agro-alimentaire, environnement et gestion des ressources naturelles, sciences humaines et sociales (SHS), ... La prise en compte de ces secteurs nécessite en particulier des travaux sur les points suivants : étude des systèmes hybrides (modèles mathématiques et données), techniques de réduction de modèles, couplage de modèles et modélisation multi-physique, contraintes HPC temps réel, optimisation et contrôle optimal de systèmes complexes.

3.2.3 Partenariats

Vu le caractère transverse de ces travaux, des collaborations sont un axe de développement essentiel garantissent l'efficacité des actions de Systematic. Ces actions sont en place et se développent avec les porteurs de grands secteurs applicatifs et avec les offreurs de nouvelles technologies (réseaux, quantique.)

EuroHPC :

L'initiative européenne EuroHPC va jouer un rôle structurant fondamental dans le domaine du HPC/HPDA dans les années à venir. Dans le cadre notamment d'initiatives européennes à monter tant au niveau des infrastructures que des développements technologiques et applicatifs, les projets devront se référer aux différentes actions et structures mises en place dans le cadre de cette initiative.

Teratec :

Teratec est une association de loi 1901, dont l'objet est la maîtrise et la diffusion des technologies numériques HPC/HPDA. Pour cela, Teratec fédère la majorité des acteurs du secteur, offreurs de technologies, grands utilisateurs et centre de recherche et de formation.

Teratec est étroitement associé aux grandes initiatives nationales et européennes, parmi celles-ci il convient de citer au niveau national les plans industriels nationaux, la mise en place de grands projets collaboratifs en partenariat avec Systematic, la

promotion vers les PME/ETI avec le programme SiMSEO, programme où a été associé Systematic. Au niveau européen Teratec est très fortement impliqué dans l'initiative EuroHPC et participe activement aux centres d'excellence et aux futurs centres de compétences.

Teratec organise chaque année le Forum Teratec qui, en regroupant plus de 1300 participants, constitue l'une des grandes manifestations européennes dans le domaine du HPC/HPDA.

Genci

Genci prend la forme d'une société civile, créée en 2007 par l'état pour assurer la maîtrise d'ouvrage nationale pour le calcul intensif et le stockage de données de traitement. Le GENCI offre un accès gratuit aux heures de calcul et au stockage par le biais d'une procédure biannuelle d'appel à projets, et sélection sur critère d'excellence scientifique. Cette procédure est ouverte aux chercheurs académiques et aux industriels avec publication des résultats. En 2019 plus de 1,9 milliard d'heures ont été mises à disposition par ce biais et 600 projets dans tous domaines ont bénéficié de l'allocation d'heures de calcul.

Le Genci est fort d'une équipe de 14 experts HPC.

NAFEMS

NAFEMS : leur mission est d'aider les entreprises face au choix des technologies de simulation numérique, à l'évolution de leurs connaissances dans ces domaines et à une utilisation optimale de ces technologies dans le cycle PLM.

3.3 Quantum

3.3.1 Périmètre technique – Généralités

On sait que la loi de Moore va commencer à fléchir avant de stagner. Elle dispose que grâce en particulier à l'augmentation régulière de la densité de transistors sur un chip, on observe que tous les 18 mois, la puissance de calcul accessible double. Cela a permis de grandes avancées sur tous les terrains liés au numérique.

Or les meilleures technos de chip sont aujourd'hui autour du 10 nm, et l'on arrive aux dimensions atomiques (il y a environ 0,3 nm entre deux atomes dans le cristal de silicium). On ne pourra pas descendre beaucoup plus bas. Des alternatives sont donc recherchées pour continuer à offrir cette augmentation de puissance continue.

On a imaginé assez tôt à partir des années 70 que des qubits (quantum bits) pourraient améliorer des algorithmes de calcul grâce aux propriétés quantiques de superposition

et d'intrication. David Shor a démontré en 1994 la réalité théorique d'accélération véritablement exponentielles avec son algorithme de factorisation. Ce coup de tonnerre a lancé la course au calcul quantique. En 1998, ont suivi les premières expérimentations physiques de qubits (IBM).

On distingue 3 volets comme pour le HPC traditionnel : réseau, stockage et calcul :

- Réseau : essentiellement basée sur les propriétés quantiques des photons, ce volet est traité dans le hub Optique.
- Stockage : un système de n qubits peut en théorie séparer et stocker 2^n éléments d'information, ce qui constitue une forme d'accélération, mais qui repose sur le concept de QRAM, qui n'a pas été expérimenté à ce jour. Encore plus que le calcul, la QRAM souffre des problèmes de stabilité inhérents aux superpositions et intrication forte quantiques. Ce verrou technologique doit être intégré dans le Hub Digital Engineering, en veille technologique.
- Calcul : au cœur du Hub Digital Engineering, la partie calcul quantique optique étant traitée conjointement avec le Hub Optique.

Les différentes architectures d'accélération quantique en visibilité aujourd'hui sont les suivantes :

- 1) Calcul quantique adiabatique.
- 2) NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum computing), à qubits physiques.
- 3) QEC (Quantum-error corrected), à qubits logiques.

Les bases hardware sont établies, les progrès nécessaires (en termes de stabilité et de scalabilité) sont identifiés et en cours d'étude par le secteur académique sur des financements étatiques ou européens (Quantum Flagship), voire industriels (Intel, Microsoft, IBM qui sous-traitent notamment à des laboratoires européens). Ceci nous amène à des concepts de plateformes de calcul hybrides. Les enjeux industriels s'expriment maintenant également en termes d'applications et de développement de software, ce qui inclut les questions de simulation/émulation de systèmes quantiques (cf. QLM d'Atos).

3.3.2 Périmètre technique détaillé

3.3.2.1 Calcul quantique adiabatique

Contexte et enjeux

Le calcul quantique adiabatique a été théorisé par Edward Farhi (MIT) en janvier 2000. Il est comparable au recuit simulé en métallurgie. Un système est dans un état propre de départ connu, on fait varier lentement certains paramètres physiques (comme la

température en métallurgie) de son hamiltonien (opérateur énergie) et l'on arrive au final à l'hamiltonien cible dans un état propre correspondant au minimum d'une fonction.

La société canadienne D-Wave a démarré son activité en 1999 et a été la première à vendre des machines de calcul quantique, basées sur cette technique, et ce dès 2007. Elle est réputée résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire du type voyageur de commerce, qui s'implémentent facilement sous forme de minimisation d'opérateurs d'énergie. Cette approche technologique fait débat dans la communauté académique quant à la réalité des phénomènes quantiques sous-jacents.

Problématique et défis techniques

- Intrication quantique reste à démontrer et à calibrer.
- Pas de concurrence et de benchmark.
- Développements purement industriels, sans support académique.
- Existence d'alternatives similaire et non-quantiques (Fujitsu).

3.3.2.2 Architecture de calcul à qubits physiques (NISQ)

Contexte et enjeux

John Preskill du CallTech a introduit lors de la conférence Q2B 2017 cette notion de NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum computing) reprise par toute la communauté. Elle s'oppose aux systèmes quantiques universels, encore lointains voire incertains, sous la forme de systèmes quantiques à 50 à 100 qubits physiques, sans correction d'erreur. Il considère :

- Que ces systèmes sont mûrs technologiquement, on entre dans l'ère NISQ (cf. annonces d'IBM, Google, IonQ et Atos).
- Qu'ils apporteront un avantage quantique face aux calculateurs classiques grâce à l'existence d'algorithmes qui permettent d'en tirer parti, dans différents domaines : chimie quantique, physique nucléaire, science des matériaux, etc. Se développent par ailleurs des algorithmes hybrides (tels VQE ou QAOA) qui peuvent être utilisés pour du machine learning (clustering par exemple) sur des accélérateurs NISQ grâce à la faible profondeur de la partie quantique.

S'agissant du nombre de Qubits physiques nécessaire pour donner un avantage quantique, on peut estimer qu'il devra nettement dépasser 50 et se rapprocher de 100, voire quelques centaines. Par ailleurs, on peut inclure dans cette catégorie tout système à base de qubits physiques (donc supérieur à 100) sans dispositif de correction d'erreurs.

Problématique et défis techniques

- Peu d'applications disponibles pour le NISQ.
- Peu d'algorithmes hybrides, mais domaine d'intérêt émergent.
- Pas encore de démonstration avérée d'avantage quantique, que l'on pense imminente (- de 5 ans, voir l'article de Google -non encore publié- sur l'algorithme RCS).
- Problèmes d'industrialisation pour sortir des laboratoires.

3.3.2.3 Architecture de calcul à qubits logiques (QEC)

Contexte et enjeux

Cette architecture s'apparente aux calculateurs classiques. Un registre de qubits (quantum bits) subit un certain nombre d'opérations physiques assimilables à des portes à une ou deux entrées (ces deux types de portes quantiques suffisent pour tous types de calcul comme en algèbre booléenne). Elles permettent d'assurer le niveau de superposition et d'intrication nécessaires. Ces Qubits physiques sont sujet à des erreurs (bruit quantique, décohérence) et sont corrigés pour devenir des qubits logiques et garantir des opérations justes. Différentes technologies hardware sont à l'étude pour ces nouveaux qubits, purs ou hybrides : supraconducteurs, ions piégés, silicium, photoniques, topologiques, impuretés diamant, etc.

La plupart des use-case identifiés susceptibles d'être accélérés démontrant une accélération quantique nécessitent ce type d'architecture, et ce avec un grand nombre de qubits logiques : par exemple décrypter le RSA standard par l'algorithme quantique de Shor nécessite plusieurs milliers de qubits logiques en intrication forte (20 millions de qubit physiques).

Problématique et défis techniques

- Détection et correction d'erreur très coûteuses en qubits physiques.
- Scalabilité pour atteindre les dimensions requises par les applications prétendantes.
- Horizon incertain (20 ans ou jamais, ce qui nécessite des disruptions technologiques).

3.3.3 Les applications du calcul quantiques

Problèmes de recherche opérationnelle :

Dans cette catégorie on va trouver les problèmes d'optimisation combinatoire et qui seront traitables sur les premiers NISQ. La liste est non-exhaustive tant les applications sont nombreuses. On peut citer :

- Gestion de la production et de la distribution d'énergie.
- Gestion d'une flotte de véhicules.
- Gestion du trafic routier et aérien.
- Management du risque financier pour les banques.

Ces problèmes sont particulièrement intéressants car ils s'adaptent très bien aux NISQ. En effet l'utilisateur final n'est pas à la recherche de la solution optimale absolue. Une solution plus optimale que celle qu'il a déjà, obtenue plus rapidement et sur un plus grand espace de paramètres peut générer des gains d'échelle très importants. De plus, si l'optimisation est une tâche complexe, le problème inverse de sa vérification l'est beaucoup moins. L'utilisateur sait donc rapidement si la solution trouvée est intéressante ou pas, sans avoir à passer par une phase de mise en œuvre, parfois couteuse, sur le terrain.

C'est une méthode efficace pour tirer profit d'un calcul imparfait car non corrigé des erreurs mais qui explore un grand espace de paramètres.

Modélisation et simulation (NISQ plus puissants) :

- Simulation des matériaux.
- Calcul des structures moléculaires pour la chimie et l'industrie pharmaceutique.

Applications aux systèmes linéaires de (très) grande taille (pour les QEC) :

- Modélisation du climat.
- Imagerie sismique.
- Machine learning.

3.3.4 Orientations techniques & stratégiques

3.3.4.1 Vision stratégique

Aujourd'hui, le calcul quantique adiabatique n'a pas fait la démonstration de sa capacité à atteindre un jour la suprématie quantique, néanmoins il nécessite d'être toujours considéré dans la roadmap et suivi.

Les accélérateurs NISQ arrivent, c'est maintenant une question d'années avant des livraisons opérationnelles chez les clients utilisateurs, que ce soit en mode SaaS ou on-premise. Ce doit être une priorité que d'anticiper et d'accompagner ce mouvement et d'y préparer l'écosystème du hub DE. La publication du plan national quantique (mission parlementaire) devrait jouer un rôle de catalyseur. On espère la première livraison d'un coprocesseur quantique autour de 2023.

Les ordinateurs QEC se heurtent à des difficultés technologiques majeures en ce qui concerne la scalabilité, la stabilité temporelle et la correction d'erreurs. On ne les voit pas arriver avant 20 à 30 ans. Peut-être n'arriveront ils jamais à défaut de disruption technologique hardware. Toutefois, il importe à ce stade de rester inscrit dans cette dynamique, compte tenu de l'énorme potentiel prévisible (sécurité, finances, énergie, etc.) pour des technologies encore à bas TRL au niveau recherche et innovation. Les disruptions espérées peuvent provenir de l'écosystème Systematic.

3.3.4.2 Priorités stratégiques

Contrairement à d'autres pays (comme Royaume-Uni, Allemagne, Suède, Pays-Bas, Autriche, etc.), la France met tardivement en place un plan national de développement des technologies quantiques, dont le calcul (à updaté à la sortie du plan). L'écosystème Systematic s'inscrit pleinement dans la mise en œuvre de ce plan, en particulier en capacité de piloter la constitution de consortia des actions lancées (grands défis, PSPC, AMI, etc.). De la même façon, il suit le déroulé du flagship européen, et de son successeur.

3.3.4.3 Verrous technologiques

Les verrous technologiques sont :

- Mémoire, QRAM.
- Benchmark quantique, comment comparer différentes technologies.

3.3.4.4 Priorités à l'élargissement de l'écosystème

Certains partenaires essentiels au-delà des membres actuels du pôle Systematic ont d'ores-et-déjà été identifiés. On peut citer le SIRTEQ, TERATEC (initiative TQCI avec le CCRT), le GENCI.

Un nombre grandissant de startups et de labos académiques investissent dans le domaine, y compris en Ile de France (représente environ 80% de la R&D française en quantique). Une action particulière de cartographie francilienne, puis le cas échéant d'actions spécifiques de recrutement dans le hub DE devront être menées.

3.3.5 Les acteurs en Ile de France

Au niveau académique, les réseaux SIRTEQ, TERATEC et GENCI donnent une excellente vision de l'écosystème.

Hardware		Software		Use-cases Utilisateurs	
PASQAL	QUANDELA		ATOS	Prevision.io	EDF, Total, Airbus
Plateforme NISQ à base d'atomes froids	Composants pour plateforme NISQ photonique		Simulation et programmation	Intégration d'algorithmes quantiques en machine learning	Vieillessement des matériaux, optimisation des smarties

Sources :

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_companies_involved_in_quantum_computing_or_communication

Rapport d'Olivier Ezratti (2019) :

<https://www.oezratty.net/wordpress/2019/rapport-ces-2019/>

3.4 Ingénierie Système et Logiciel

3.4.1 Périmètre technique - Généralités

Tout d'abord, commençons par préciser notre sujet d'intérêt, les systèmes qui sont de plus en plus complexes. Précisément, le périmètre système qui nous intéresse ici est celui des systèmes dont la ou les fonctions reposent sur la présence, de plus en plus prépondérante, de logiciels. Notons que ces systèmes peuvent être ou non embarqués. Dans ce dernier cas il faut principalement résoudre, en plus, un problème d'optimisation d'encombrement, de poids, d'énergie, etc. Entreront ainsi dans cette catégorie, les systèmes dits cyber-physiques car ils contrôlent un environnement physique comme les systèmes mécatroniques, les systèmes IoT, etc.

Leur développement fait l'objet d'une compétition économique – et donc technologique – acharnée entraînant des contraintes toujours plus fortes. Parmi ces contraintes, reviennent le plus souvent la réduction des coûts et des temps de développement et l'amélioration de la qualité des produits. De plus, il ne faut pas oublier l'impérieuse nécessité de proposer toujours plus de nouvelles fonctionnalités, en les rendant toujours plus communicantes et interconnectées, afin de séduire un maximum de nouveaux clients. Ce glissement de « l'utilisateur » au « client » a pour conséquence d'étendre l'ingénierie au-delà des parties prenantes habituelles par la prise en compte des fonctions marketing et commerciales. Par ailleurs, puisque faisant

partie de notre vie quotidienne, le fonctionnement des systèmes complexes doit se conformer de plus en plus à un nombre croissant de contraintes normatives. On peut citer entre autre les normes de sûreté (par exemple, ISO 26262, CEI 61513 et CEI 62061) et de sécurité, ou encore les normes anti-pollution (par exemple, les normes d'émissions « Euro » pour les moteurs thermiques). La nature même des systèmes cyber-physiques, c'est-à-dire leur relation au monde physique, et les contraintes susmentionnées font de ces derniers des systèmes complexes.

Quand on s'intéresse à la complexité des systèmes, il est important de faire la distinction entre complexité essentielle et complexité accidentelle telles que définies par Brooks dans [Frederick P. Brooks 1987] :

- La complexité essentielle est relative à la nature même du système. Elle est inévitable et pour les raisons détaillées ci-avant (compétition et normes), elle est en expansion dans le domaine des systèmes cyber-physiques.
- La complexité accidentelle est celle qui naît soit de l'utilisation de mauvais moyens de développement (par exemple, des outils inadaptés ou des méthodes de travail trop généralistes pour être efficaces), soit d'une mauvaise utilisation des moyens disponibles (par exemple, utiliser un outil sans lire son mode d'emploi peut s'avérer contre-productif). La complexité accidentelle liée au développement des systèmes est donc évitable, si l'on utilise les bons moyens de la bonne méthode.

La raison principale qui explique le phénomène de croissance de la complexité essentielle des systèmes est ce besoin vital que chaque entreprise a d'innover dans ses produits. Cela se traduit principalement par plus de fonctions et plus d'interactions (communications). Or, si on augmente le nombre des fonctions et le nombre des interactions entre les fonctions, il est aisé de comprendre qu'on augmente inexorablement la complexité (essentielle) des systèmes. De plus, la composition de fonctions peut-être à l'origine de comportements dît émergents rajoutant un élément supplémentaire de complexité. Le problème actuel est que le niveau de complexité atteint dépasse déjà les capacités humaines à les gérer [Robert N. Charette 2005]. Aller plus loin, nécessite donc de nouveaux moyens plus puissants et plus efficaces pour aider les parties prenantes d'un développement à gérer et maîtriser cette complexité.

En ce qui concerne la complexité accidentelle, celle-ci est par définition un phénomène que l'on peut éviter, il suffit pour cela de la prévenir. Si elle est la conséquence d'une utilisation inappropriée de langages, méthodes, processus, technologies, et/ou outils, éliminer ce type de complexité revient à mettre en place des artefacts méthodologiques appropriés au domaine d'application et/ou aux différentes préoccupations des acteurs du développement.

Quelle soit accidentelle ou essentielle, la complexité des systèmes et des logiciels est donc un enjeu majeur pour notre société. Par la suite, nous allons détailler plus en avant ces enjeux en les classant selon trois thèmes :

- Vers un déploiement industriel : La maîtrise de la complexité a de tout temps été le sujet de nombreux travaux de recherche donnant lieu à des résultats prometteurs qui n'ont pas toujours trouvé écho dans l'industrie. Il s'agira ici de discuter de certains enjeux que nous estimons importants de porter plus fort auprès de l'industrie.
- Vers de nouveaux paradigmes : On se focalise ici sur les nouveaux paradigmes de conception permis par la levée des verrous sur les outils d'ingénierie actuels ainsi qu'aux nouveaux besoins d'outils d'ingénierie générés par les avancées sur les nouvelles architectures de traitement : many-cœurs, computing neuromorphique, edge computing, IoT, etc.
- Extension du périmètre de l'ingénierie système : On s'intéresse ici aux conséquences sur les outils des nouvelles pratiques industrielles telles que l'entreprise étendue ou l'extension de l'ingénierie au-delà des parties prenantes habituelles.

3.4.2 Périmètre technique détaillé

3.4.2.1 Vers un déploiement industriel

Contexte et enjeux

L'ingénierie des systèmes et des logiciels recouvre les méthodes et les outils de conception, vérification, validation. Pour les systèmes de tous types, l'ingénierie logicielle est étroitement liée à l'ingénierie système. De l'ingénierie des exigences à l'IVVQ (Intégration, Vérification, Validation, Qualification), les pratiques de modélisation (fonctionnelle, non-fonctionnelle, dysfonctionnelle) formelles ou non formelles, sont de plus en plus utilisées.

Les méthodes formelles – on peut citer par exemple, l'analyse statique de logiciels, la preuve de programme, les techniques de vérification, ou encore de génération automatique de tests, les méthodes d'analyse pour diagnostic - introduites historiquement pour des systèmes dits critiques comme les centrales nucléaires ou l'avionique, on fait leur preuve sans aucun conteste dans ces domaines. Néanmoins, leur usage reste plutôt confidentiel, souvent restreint à une poignée de spécialistes. Il est pourtant évident que cela devrait changer car de plus en plus de domaines partagent des préoccupations communes avec ces domaines spécifiques dits critiques et devraient donc progressivement bénéficier de l'intérêt des techniques et des méthodes formelles.

L'intérêt des approches dites d'ingénierie dirigée par les modèles ne fait également plus débat même si leur mise en œuvre au niveau industriel reste trop limitée. Parmi les freins majeurs, on peut citer les habitudes de travail.

Problématique et défis techniques

Dans ce contexte, l'ingénierie des systèmes et des logiciels doit évoluer pour lever des verrous se décomposant en deux catégories :

- Technologique :
 - La gestion des comportements probabilistes ;
 - L'exploration de l'espace de conception ;
 - La simulation hybride discret-continu ;
 - Les modèles et les outils spécifiques pour prendre en compte conjointement plusieurs préoccupations, comme la sécurité, la sûreté de fonctionnement, la performance et la qualité ;
 - La consolidation et la mise en pratique des principes théoriques de développement par contrat et de compositionnalité ;
 - Les garanties de propriétés pour des systèmes dynamiques et reconfigurables ;
 - L'intégration d'artefacts existants dans de nouveaux systèmes contraints par de nouvelles exigences, par exemple des exigences de cyber-sécurité ;
 - L'accélération des cycles de développement et capacité à l'innovation ;
 - La facilitation/accroissement et le déploiement des méthodes et des techniques formelles pour satisfaire les besoins des systèmes critiques ;
- Méthodologique :
 - L'évolution des règles et des pratiques de certification ;
 - L'innovation disruptive en termes de concepts, d'usage et de contraintes de conception architecturale système ;
 - Le déploiement des méthodes agiles et la gestion de la dette technique afférente – « DevOps » versus ingénierie système et logicielle et maîtrise de la maintenabilité versus gestion des dettes techniques ;
 - L'amélioration de la réutilisation et de l'ingénierie de ligne de produits ;
 - L'aide à faire les « bons » choix technologiques (souvent stratégiques) dans un domaine aussi effervescent que le numérique ;
 - Comment mesurer les gains à déployer des nouvelles méthodes et des outils ;
 - L'expérience utilisateur quant aux outils de modélisation et aux outils d'analyse formelle – il s'agit d'une part d'améliorer les outils eux

même, mais aussi de modifier la perception des utilisateurs ou l'acceptabilité des outils.

Bien sûr, cette liste n'est pas exhaustive. Par ailleurs, globalement, le problème de passage à l'échelle se pose pour des outils en apparence simples (gestion de configuration, tout au long du cycle de vie, et en particulier sur les systèmes modifiés après déploiement) ou complexes (outils basés sur des méthodes formelles).

3.4.2.2 Vers de nouveaux paradigmes

Contexte et enjeux

Industrialiser l'état de l'art académique ne sera pas suffisant. D'une part, parce que cela ne fera pas toujours du sens, d'autre part parce que tous les problèmes ne sont pas résolus actuellement, et enfin parce que de nouveaux problèmes émergent déjà, du fait de l'apparition de :

- Nouvelles formes de traitement, comme par exemple les solutions implantées sur des processeurs multi et pluri-cœur, les solutions de calcul neuromorphique qui sont encore en phase d'émergence ou les systèmes à base d'objets connectés de périmètres non bornés, le edge computing, ou encore les ordinateurs quantiques,
- Nouveaux paradigmes de conception apparaissant suite à la levée des verrous sur les outils d'ingénierie existants comme par exemple les architectures à base de micro-services,
- Ou encore de nouvelles parties prenantes, et avec elles la nécessité d'intégrer de nouvelles préoccupations supplémentaires dans l'activité d'ingénierie système et logicielle. Ce dernier point inclut les nouvelles contraintes et besoins issus de la problématique de l'entreprise étendue.

Pour répondre aux besoins et satisfaire les contraintes afférentes de ces nouveaux entrants, il est donc nécessaire que de nouveaux paradigmes, de nouvelles techniques et technologies soient pensées et inventées.

Au niveau des outils, qu'il s'agisse d'améliorer leur accessibilité ou d'accroître leur performance, l'un des espoirs repose sur l'intelligence artificielle. Plus précisément, les attentes reposent sur l'introduction de composants d'intelligence artificielle dans les outils pour assister les utilisateurs dans leur travail. On peut parler de « cognification » des approches, au sens de Kevin Kelly dans « The Inevitable: Understanding the 12 Technological Forces That Will Shape Our Future ».

L'interconnexion des systèmes ne cesse de croître conduisant à ce que les systèmes-de-systèmes soient de plus en plus présents ; les nouvelles organisations « tout numérique » et les nouveaux modèles économiques afférents, tout cela implique de

plus en plus de parties prenantes qui devront coopérer de manière cohérente, consistante et efficace et milite pour une suppression progressive des silos fonctionnels. Des systèmes de plus en plus ouverts (versus des systèmes fermés dont les interactions avec leurs environnements sont connues a priori) sont également à l'origine de nouveaux problèmes, comme par exemple des comportements émergents.

Problématique et défis techniques

Concernant le traitement neuromorphique les problématiques identifiables concernent :

- L'insertion d'intelligence dans les systèmes, typiquement l'agrégation de définition de comportement classique et de comportement de type neuromorphique dont on pourra trouver un exemple dans les systèmes autonomes,
- La preuve de confiance sur les traitements neuromorphiques dont le comportement dépend de données d'apprentissage.
- La définition et la preuve de robustesse de ces mêmes traitements (gestion de l'incertitude),
- La conception d'IA (structuration / organisation au niveau hardware et au niveau software, passage à l'échelle en nombre de couches et de neurones par couche) en fonction du problème posé, de la base d'apprentissage, etc.,
- La prise en compte des contraintes temps réel pour les algorithmes d'IA non supervisé lorsqu'ils sont inclus dans une boucle de contrôle commande dans un système cyber-physique.

Concernant les systèmes ouverts (versus des systèmes fermés dont les interactions avec leurs environnements sont connues a priori), comme par exemple les systèmes IoT, les verrous identifiables sont :

- La gestion du nombre croissant de ces systèmes communicants, soit entre eux, soit avec des infrastructures comme les calculateurs et le stockage dans le nuage,
- La cohérence des traitements et surtout des données produites et consommées par ces systèmes.

Concernant les nouveaux paradigmes de conception permis par la levée des verrous sur les outils d'ingénierie existants, on notera les systèmes-de-systèmes et les enjeux associés de :

- Maîtrise de préoccupation de niveaux plus abstraits pour les intégrations résultantes,
- Maîtrise des comportements émergents et des interactions,

- Coévolution et prise en compte du cycle de vie des composantes d'un système complexe.

L'extension des types de parties prenantes à l'intérieur de l'entreprise ou à l'extérieur dans un contexte d'entreprise étendue de celle-ci soulève entre autre les problématiques suivantes :

- Articulation entre spécialisations et interdisciplinarité (dé-silotage technique),
- Boucle courte entre toutes les parties prenantes,
- Travail conjoint et itératif,
- Ingénierie collaborative,
- Partage des mêmes pratiques et connaissances,
- Gestion des contraintes liées à la propriété intellectuelle (propriété, protection des modèles, des données et des savoirs faire, etc.).

3.4.2.3 L'accélération de l'ingénierie système

Contexte et enjeux

Les méthodes et outils issus du monde de l'embarqué et des systèmes critiques ont servi des priorités principalement techniques –par exemple, comment faire plus fiable, plus sûr, plus maintenable, plus économe en énergie, plus efficace en puissance de traitement, plus rapide – tout en assurant une maîtrise des coûts et des délais compatibles avec les contraintes métiers.

Aujourd'hui, l'extension des pratiques, des méthodes et des outils issus de l'embarqué au monde de l'IT, de même que la vague IoT, qui comme indiqué en introduction du document reconnecte l'IT et les systèmes, a pour effet de confronter les pratiques d'ingénierie et les contraintes métier du monde de l'IT aux pratiques d'ingénierie et les contraintes du monde de l'embarqué et des systèmes critiques.

On retiendra comme « tension » résultante, la contrainte d'agilité et la forte réactivité imposée par l'accélération des transformations imposées par l'évolution des métiers confrontée au besoin de maîtrise de la performance sous toutes les formes imposées par les systèmes embarqués.

Problématique et défis techniques

On retiendra comme défis techniques et méthodologiques principaux :

- La mise en cohérence des processus d'ingénierie qui sont de fait appliqués par des populations d'ingénieurs de cultures différentes. Le problème réside dans la contradiction de la réduction extrême des cycles d'innovation et de

développements poussée par les approches de type « DevOps » confrontée aux évolutions des architectures de systèmes dont le rythme de mise à jour est notamment plus lent,

- La préservation/maintenance d'architectures de systèmes alors que les méthodes agiles tendent à favoriser l'optimisation locale et la problématique de gestion des dettes technologiques souvent résultantes des approches agiles,
- La conservation de la maintenabilité en assurant une gestion optimale de la dette technique.

3.5 Transition numérique

3.5.1 Périmètre technique – Généralités

Dans un monde de plus en plus concurrentiel confronté à des modes de consommation versatiles, les entreprises doivent s'adapter pour tirer profit efficacement des technologies numériques.

Dans cet univers en constante mutation, les entreprises doivent se transformer au risque sinon de voir leur activité au minimum diminuer, au pire disparaître, au profit d'acteurs plus rapides à s'adapter. On peut craindre le numérique, mais aussi comprendre ses opportunités.

Dans ce contexte particulier, la résistance au changement est souvent forte, l'engagement des organisations vers la transformation numérique lente, les discours souvent en contradiction avec les actions menées. Nous sommes en effet au commencement d'une révolution, porteuse de nombreuses innovations et créatrice d'une nouvelle dynamique de performance.

Cette transformation s'appuie comme toujours sur l'évolution de concert de trois dimensions : le système opérationnel de l'entreprise, le management de la performance du dit système et l'état d'esprit individuel et collectif des ressources qui le gère.

Sur ces trois dimensions pour ce qui concerne la transition numérique, on observe trois familles de leviers : **l'accélération et la fiabilité des processus d'innovation** dans toutes ses composantes, **l'agilité des modèles d'organisation** et **la gestion prévisionnelle des compétences**.

3.5.2 Périmètre technique détaillé

3.5.2.1 Accélération et fiabilité des processus d'innovation

A l'extérieur de l'entreprise, l'affrontement se situe sur la capacité à innover, libérée par les potentialités du numérique.

Contexte et enjeux

Différents cadres méthodologiques d'innovation permettent de tirer parti de l'espace de liberté créative créé par le numérique. Ces différentes méthodes existent pour garantir la performance à court terme et sur le long terme. Elles permettent également de définir l'ambition de croissance, de comprendre les actifs de l'entreprise, de créer et générer des idées, d'évaluer des marchés, de prototyper des produits et services et enfin de mettre en marché. On retiendra :

- La **Théorie C-K** (pour Concept-Knowledge, en français Concept / Connaissance) qui permet de développer différentes options dans un contexte d'innovation de rupture par définition incertain ;
- Le **Design Thinking**, souvent utilisé pour concevoir des expériences enrichissantes et ciblées pour les utilisateurs finaux ;
- Le **Value Proposition Canvas** qui permet de construire de manière rationnelle une proposition de valeur qui a le maximum de chance de réussir son déploiement sur le marché ;
- Le **Business Model Canvas** qui permet de structurer l'activité de conception des modèles d'affaire ;
- le **Design de la Chaîne de Valeur** qui va s'avérer nécessaire dans le cas où un modèle d'affaire nécessite l'implication de partenaires dont le business est lui-même impacté ;
- Le **Blue Ocean Strategy** qui propose une approche analytique et un cadre d'action pour « exfiltrer » une entreprise d'un marché saturé et la redéployer dans un espace business vierge de compétition ;
- Le **Lean Startup** qui consiste en une méthode de développement de produits innovants qui promeut l'apprentissage validé comme clé du succès de la mise sur le marché ;
- Le **Modèle de Kano**, modèle tactique qui permet de mesurer la perception client du degré d'innovation d'une offre.

Ces méthodologies ont pour objet de permettre la création d'innovations en rupture ou en delta d'offres existantes, en définissant des cadres favorisant l'innovation. Les potentialités offertes par le numérique sont fortement disruptives, et les technologies sous-jacentes relativement génériques. La transition numérique est un catalyseur de l'affrontement dans l'espace des offres.

Problématique et défis techniques

Le défi principal concerne la réconciliation des cadres méthodologiques d'innovation et des environnements d'ingénierie. D'un côté, on dispose d'une discipline d'ingénierie système fortement codifiée (en particulier grâce à la généralisation des approches MBSE), celle-ci s'alimentant d'exigences plus ou moins raffinées exprimées souvent sous forme textuelle déclarative. En revanche, les cadres d'innovation sont faiblement outillés, font la promotion de démarches d'exploration itératives avec de fortes interactions externes, font la part belle à l'agilité et sont mis en œuvre par des fonctions d'entreprise peu exposées à l'usage de formalismes précis. Il est pourtant assez clair que les options soulevées lors d'une démarche d'exploration d'innovation peuvent se rattacher à la notion d'exigences ou à des vues systèmes d'un certain niveau de complexité, ce qui peut justifier un support formel. Les disciplines d'innovations et d'ingénierie systèmes ont donc besoin de se rencontrer.

Le second défi concerne les cadres méthodologiques eux-mêmes. Ces cadres permettent chacun l'analyse d'une problématique donnée mais sans lien explicite entre chacune d'entre-elles. Hors il est nécessaire de les positionner les uns par rapport aux autres et de comprendre comment ils se renforcent et se complètent. Il est d'ailleurs nécessaire de comprendre si ceux-ci sont assez « couvrants » par rapport à la problématique de transition numérique.

Le troisième défi concerne les contraintes d'application des cadres méthodologiques: comment ceux-ci doivent-ils être employés selon le contexte. La taille de l'entreprise ou son domaine d'activité ont-ils une importance? Quels sont les critères qui doivent guider l'instanciation de ces cadres analytiques ?

3.5.2.2 Agilité des modèles d'organisation

A l'intérieur de l'entreprise, la transition numérique impose aussi sa marque.

Contexte et enjeux

De nouveaux modèles organisationnels voient le jour, unifiant développement applicatif et opérations. L'aboutissement des projets de transformation numérique en devient corrélé, et les progrès de la numérisation des organisations sont désormais portés par l'adoption des meilleures pratiques.

- Le **DevOps** est une pratique innovante en ingénierie informatique visant à unifier le développement logiciel et l'administration des infrastructures informatiques. De la volonté d'appliquer des méthodes agiles à l'entreprise, le DevOps a recourt à des cycles itératifs courts pour le développement et déploiement de nouvelles versions de produits, services, ou autres offres de

nature numérique. Cette pratique permet une meilleure atteinte des objectifs économiques de l'entreprise.

- **L'Entreprise agile** est une entreprise qui apporte des solutions concrètes et personnalisées à ses clients, qui coopère pour améliorer sa compétitivité, qui s'organise pour maîtriser le changement et l'incertitude, et enfin qui se nourrit de la richesse de ses collaborateurs et de son patrimoine informationnel. L'agilité encourage l'innovation, en favorisant la collaboration entre les individus, en renforçant leur motivation par l'autonomie et en introduisant une culture de l'expérimentation et de l'amélioration continue. A ce titre, l'OpenGroup travaille à l'élaboration de l'O-AAF (Open Agile Architecture Framework), nouveau cadre d'architecture d'entreprise répondant à cette réalité. L'agilité permet aussi de gérer des situations complexes, comme la fusion de modèles opérationnels et des systèmes d'information lors d'opérations de croissance externe.

Problématique et défis techniques

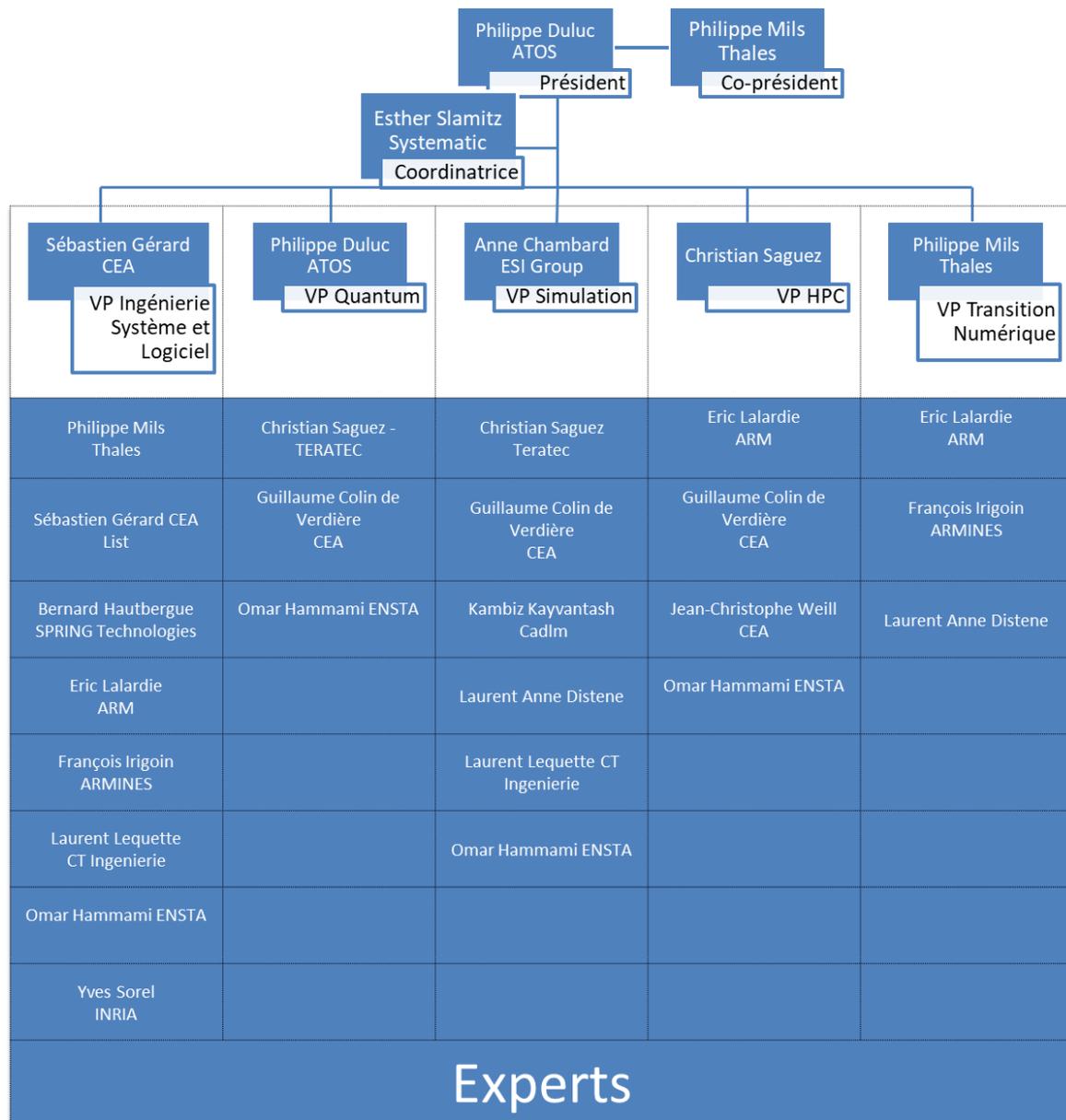
La gestion du changement est un sujet relativement ancien sur lequel existent à la fois une lecture abondante et une offre de conseil riche. Le défi qu'il convient d'adresser n'est pas celui-ci mais plutôt de recenser les cadres d'analyse permettant d'évaluer la capacité de changement d'une organisation et son écart vis-à-vis d'une situation où le changement est institutionnalisé dans l'entreprise. La première étape serait donc de produire cet état des lieux. Sans prétendre remplacer les acteurs du domaine, cela permettrait d'aider au diagnostic des acteurs de l'écosystème pour une meilleure connaissance par Systematic de celui-ci.

4 Missions et mise en œuvre

4.1 Gouvernance du Hub Digital Engineering

La gouvernance du Hub Digital Engineering possède une structure visant à servir au mieux les différentes missions qui lui sont assignées.

La figure ci-dessous synthétise l'organisation :



L'organisation est présidée par un binôme fixant le rythme de l'action et mobilisant les ressources du pôle et du Comité de Pilotage (COFIL) dans la mise en œuvre opérationnelle de la feuille de route.

Cinq VP sont définis, chaque VP portant une thématique technique du Hub. Ces cinq VP et la présidence du pôle s'adosent au savoir-faire et à l'expertise issue des membres du Comité de Pilotage, experts d'un ou plusieurs domaines thématiques du pôle.

La présidence, les VP et membres du Comité de Pilotage sont des professionnels ou scientifiques issus de différentes organisations œuvrant à titre bénévole et à temps partiel dans cette organisation.

Cette organisation s'interface à la structure permanente de Systematic via la coordinatrice du Hub véritable cheville ouvrière de l'organisation, assurant la continuité de service du Hub, gérant les alertes, organisant opérationnellement les événements planifiés, sollicitant et impliquant au besoin les autres services de Systematic.

Dans les sections suivantes nous décrivons comment sont déclinées dans le Hub les différentes missions telles qu'elles ont été définies dans la version 4.0 de Systematic.

La figure suivante propose une cartographie des missions de support générique du pôle concernant l'écosystème des acteurs économiques. Cette cartographie recense des missions de support d'ordre plus ou moins technique ou métier couvrant différents contextes d'entreprise.

- La séparation verticale différencie les missions qui sont plutôt d'ordre support au développement technologique de celles qui sont d'ordre support au développement métier pour les entreprises.
- La séparation horizontale différencie les missions qui sont plutôt d'ordre stratégique, qui ont donc pour effet d'évaluer le besoin de transitionnel que ce soit sur le plan des offres techniques ou sur le plan du métier (business model, nouveau marché etc.), des missions d'ordre de l'accompagnement opérationnel qui ambitionne donc d'accélérer ou rendre plus efficace l'entreprise en la libérant des freins qui ralentit ses opérations.

Des relations de dépendance existent aussi entre les différentes missions cartographiées dans cette figure. Les missions situées au plus haut dans la figure peuvent être considérées comme des déclencheurs de plan d'action mobilisant des missions d'implémentation situées dans les parties basses de celles-ci. Une conséquence de ces relations de dépendances est que l'on doit s'assurer que les missions du bas permettent d'assurer l'implémentation des missions de niveau supérieur. Ainsi, puisque le rythme de mise à jour de la veille stratégique est annuel, une revisite des missions de plus bas niveau doit aussi découler de la mise à jour de la veille stratégique.

Dans la suite de ce chapitre nous passons en revue les différentes missions identifiées et nous définissons pour chacune d'entre elle :

- Son rôle, en particulier servir les missions de plus haut niveau, mais aussi son rôle direct vis-à-vis de l'écosystème.
- Le plan d'action 2019/2020 qui doit permettre d'assurer la mission en cohérence avec les autres missions du Hub.

4.2 Veille stratégique

La feuille de route du Hub Digital Engineering capture la vision du Hub. La version initiale de cette feuille de route, version 2019 est issue principalement de l'analyse menée par les membres du Comité de Pilotage avec pour objectif de définir le périmètre technique, d'élaborer la perception consolidée par les différents membres des tendances système, qui est aujourd'hui l'émergence de la tendance du Jumeau Numérique. Pour l'avenir, cette feuille de route sera réexaminée à un rythme annuel en intégrant les apports des autres Hub technologiques du pôle et les autres enjeux du pôle dans une réflexion consolidée.

4.3 Bilan Techno & Business

Mener à bien les missions du Hub nécessite une connaissance de l'écosystème qu'il devient difficile de posséder de par la taille de celui-ci, qui plus est en constante évolution. En Septembre 2019 l'écosystème du Hub Digital Engineering est constitué de 55 grands groupes, 5 ETI, 66 PME, 61 laboratoires académiques et 3 collectivités locales. Ces acteurs sont répartis sur les 5 thèmes du Hub.

Une activité de veille doit être poursuivie de manière récurrente afin de réévaluer le périmètre de l'écosystème.

- Chaque année un scan partiel des entreprises sera réalisé par interview directe afin d'évaluer leur situation, compte tenu de la vision stratégique établie précédemment. Le Hub s'attachera à mettre en place les outils de diagnostic

et d'accompagnement permettant de d'évaluer si l'entreprise doit se protéger, comment peut-elle le faire, comment celle-ci peut s'adapter plus rapidement tout en minimisant la résistance au changement, quelles alliances business pourrait-elle construire pour se renforcer etc.

- De même, un scan en largeur sur la globalité de l'écosystème est réalisé par le biais d'un questionnaire transmis à tout l'écosystème.
- De nouvelles entreprises seront auditées chaque année afin de déterminer l'opportunité de les intégrer à l'écosystème du pôle.

4.4 Accompagnement au Pivot technique ou business

Pour les entreprises en situation de risque ou à la recherche de relais de développement, le pôle a défini et anime le programme Reindustry : Il s'agit d'un accompagnement à la conception d'offres issues de technologies arrivées à maturité. L'objectif peut être aussi de viser l'élargissement des marchés des entreprises. Trois parcours sont définis : 1) Validation Techno, 2) Marketing de l'offre, 3) Mise en relation avec les donneurs d'ordre potentiels. Le pôle anime le programme Reindustry via son comité d'audition Reindustry. Le Hub Digital Engineering auditionnera les nouvelles offres des entreprises membre du Hub pour fournir un avis à destination des comités d'audition du pôle qui traitent des problématiques stratégiques des entreprises (Comité Reindustry, et Audition PME).

Le pôle qualifie les prestataires de confiance exerçant une activité de conseil sur les pivots technos et business.

4.5 Support au développement technologique ou business

4.5.1 Mise en relation

Le Hub digital engineering offre la possibilité de mise en relation vers un ou des acteurs spécifiques de son écosystème sur simple demande auprès de la Coordinatrice du Hub Digital Engineering (Cf. Gouvernance du Hub Digital Engineering). Cette mise en relation peut être sollicitée pour toute mission entrant dans le cadre de celles assurées par le Hub : Aide au montage de projets collaboratifs, organisation d'évènement, aide au développement des entreprises etc.

4.5.2 Animation de la R&D Collaborative

L'objectif de l'animation de la R&D collaborative est de faciliter le montage de projets de R&D au bénéfice des acteurs du pôle. Ceci se décline en les objectifs détaillés suivants :

- Maintenance d'un référentiel des appels à projet ;

- Instruction des appels à projet : aide à la constitution de consortiums, accompagnement par les experts sur les projets (expertise business, chaîne de valeur, solidité du consortium, proposition de partenaires entreprises, ...);
- Diffusion des calendriers / critères de sélection de projets ;
- Labellisation de propositions de projets ;
- Production de guides méthodologiques d'aide à la conception de projet collaboratif.

4.5.3 Accélération des opérations business : Accès au marché / Finance / Visibilité

Pour les entreprises en situation favorable, le problème principal est de tirer le maximum de bénéfice de leurs développements produits, ce qui nécessite d'accroître leur visibilité, l'accès aux fonds, l'accès au marché. Le pôle accompagne les entreprises dans l'accès à plusieurs dispositifs permettant de répondre à ces besoins :

- Le Pass Frenc Tech, dispositif en cours de révision, est un label qui offre un accès VIP à l'INPI, Business France, la BPI, l'UGAP (Union des Groupements des Achats Publics). Il est attribué aux entreprises en hyper croissance (application de critères quantitatifs strictes).
- L'aide à la levée de fond en particulier via l'attribution du label EIP (Entreprise Innovante des pôles) ce qui implique de procéder à l'évaluation de la crédibilité de la demande. Le pôle auditionne et juge la crédibilité lors de la tenue du comité d'audition d'experts (qui se tient aujourd'hui tous les 2 mois).
- L'attribution du label Champion, réservé aux entreprises à fort potentiel et produisant un chiffre d'affaire minimum d'environ 10M€, ce qui apporte aux entreprises détentrices visibilité et crédibilité.
- Club ETI – PME (en construction).
- L'organisation de rendez-vous d'affaires (club Open Business).

4.5.4 Formation et Recrutement

Dans un contexte de fort renouvellement des technologies, l'acquisition de nouvelles compétences reste un frein fort au développement de nouveaux produits, et services. Cette réflexion prévaut aussi pour d'autres aspects de la vie d'entreprise comme par exemple l'acquisition de compétences nouvelles en marketing ou commerce car comme on a pu le voir précédemment, la transition numérique affecte aussi le fonctionnement et l'organisation des métiers. Tous les métiers de l'entreprise sont donc potentiellement soumis à tension. Le pôle n'a pas pour objectif de concurrencer les offres disponibles mais plutôt de les interfacer et ou les compléter afin de coller au plus près aux besoins de l'écosystème.

Les axes d'actions partagés avec les différents Hubs du pôle sont les suivants :

- Etude sur les métiers émergents. 2 études ont été réalisées en 2009 et 2011 respectivement sur : « l'Ingénieur en Système Complexes » et « le Business Developer en Innovation ». Ces 2 métiers ayant à l'époque été qualifiés « d'émergents », à savoir nouveaux et/ou issus des projets collaboratifs. Ce type d'étude peut être transposable à d'autres métiers liés à la transformation numérique. Elles permettent de déterminer quels seront les besoins en compétences (quantitatives et qualitatives) liées à ces métiers en les comparant à l'offre de formation actuelle (quantitative et qualitative).
- Animation de dispositifs de mobilité (mise à disposition de seniors issus de grands groupes dans les PME pour transfert de compétence).
- Formalisation des besoins de formation relevés par le Hub et interface avec les organismes spécialisés afin :
 - D'orienter les industriels vers les formations (initiales et/ou continues) adaptées à leurs besoins
 - De développer en commun les cursus adéquats.
- Mutualisation de demandes de formations vers des organismes de formation en lots de taille critique pour que celles-ci soient viables économiquement.
- Aide à la reconversion. Opérationnellement le pôle aide, dans un processus « win-win », les entreprises dans la recherche de compétences difficiles à recruter et les personnes en reconversion à « se rencontrer ». Il s'interface avec les instituts en charge de formation et retour à l'emploi (CNAM, pôle emploi) avec la mise en place de contrat POEI (Préparation Opérationnelle à l'Emploi individuelle). L'entreprise émet une promesse d'embauche à un apprenant qui va acquérir les compétences liées à la formation dispensée par les partenaires du pôle et financée par pôle emploi dans ce dispositif.
- Développement de la Deep Tech Academy du pôle. L'objectif est de créer la structure référente des compétences dans les Deep Tech en Europe. Celle-ci sera adaptée aux besoins de l'écosystème de la transformation numérique du Pôle qui en assurant 4 missions :
 - 1) Assurer des sessions de formation découverte/sensibilisation des métiers en tension (Cyber, IA, Photonique) pour nos membres.
 - 2) Flécher vers les académiques et autres organismes spécialisés de ces métiers les industriels qui souhaitent monter en compétences.
 - 3) Organiser des conférences/symposiums avec des experts de chaque thématique technologique sur les sujets les plus pointus issus des Hubs.
 - 4) Formation par la reconversion.

4.5.5 Gestion du changement

La gestion du changement ne doit pas être négligée. En tant qu'écosystème soumis à de fortes tensions en termes d'évolution des entreprises, la gestion du changement

doit être considérée comme un sujet à part entière. Ce métier est couvert par une offre abondante issue de sociétés de conseil. Il s'agit donc pour le Hub uniquement de s'assurer que le pôle dispose d'un vivier de partenaires suffisant pour assurer cette mission et de mettre en relation ces partenaires avec les acteurs de l'écosystème pour chaque situation qui le nécessite.