



Pascale BAYLE GUILLEMAUD
Stéphane SIEBERT

Mission numérique

Rapport de synthèse

TABLE DES MATIÈRES

Executive Summary

6

• • • • •

Recommandations de la mission numérique (MN)

8

- a. Choisir et afficher les axes forts du CEA dans le numérique 8
- b. Adopter des modes de fonctionnement adaptés aux exigences du numérique, plus transversaux et plus agiles 9
- c. Mobiliser en interne et en externe avec des projets vitrines 10
- d. Confier le suivi des actions au comité de coordination de la MN 11
- e. Stimuler les partenariats académiques et industriels essentiels 12
- f. Favoriser une insertion responsable du numérique dans la société et accroître la visibilité du CEA dans ce champ 13

• • • • •

Préambule

15

- a. Objet de la mission 15
- b. Déroulement de la mission – démarche de co-construction 16

• • • • •

1. Éléments de contexte, positionnement et benchmark du CEA

18

- a. Un contexte national qui identifie dans le numérique un levier important de l'ambition de la France en matière d'innovation et de souveraineté industrielle 19
- b. Un contexte européen d'amplification de l'action dans le domaine numérique 20
- c. Contexte académique et benchmark du positionnement du CEA 22

• • • • •

2. Vision du numérique du futur

28

- a. Les ressorts de développement du numérique depuis 70 ans 29
- b. Un contexte industriel marqué par le fort pouvoir de transformation du numérique 30
- c. Le numérique du futur 31

• • • • •

3. Etat des lieux du numérique au CEA	37
a. Recensement des compétences et des points forts du CEA	39
b. Recensement des plateformes	43
c. Conclusion : le CEA est un acteur majeur, mais méconnu, du numérique en France au côté d'INRIA et du CNRS	44
d. Pour autant, le potentiel du CEA dans le numérique est-il pleinement exploité ?	45



4. Cohérence d'ensemble au CEA	47
a. A l'origine des innovations, la recherche fondamentale exploratoire et la recherche amont	48
b. Couverture de la chaîne de valeur	49
c. Le numérique au service des missions du CEA	50



5. Axes forts du CEA	56
a. AXE1 – Solutions matérielles et logicielles pour accompagner les voies du calcul	58
b. AXE2 – Systèmes de calcul distribués communicants	61
c. AXE3 – Perception numérique, capteurs avancés et instrumentation	64
d. AXE4 – IA de Confiance, IA embarquée	67
e. AXE5 – Cybersécurité	71
f. AXE6 – Usine et installation du futur	73
g. AXE7 – Numérique au service de la transition énergétique	76
h. AXE8 – Numérique frugal et durable	78



6. Des modes de fonctionnement adaptés aux exigences du numérique	81
a. Propositions pour la gouvernance des actions suggérées	83
b. Coordination des programmes et projets transversaux et articulation avec la structuration en mailles du CEA	85
c. Animation bottom up de la communauté du numérique au CEA	86
d. Animation de plateformes mutualisées : génie logiciel, matériaux, données	89
e. Des projets vitrines pour mobiliser en interne et en externe : les « Moonshots »	92
f. Recherche « Blue Sky »	95
g. Qualité des chercheurs	96



7. Partenariats au service de la stratégie du CEA	98
a. Partenariats académiques nationaux	99
b. Partenariats académiques européens et internationaux	101
c. Partenariats industriels stratégiques	102
d. Vue d'ensemble des partenariats : nécessité scientifique et vecteurs de la mission du CEA	104



8. Favoriser une insertion responsable du numérique dans la société et accroître la visibilité du CEA dans ce champ	108
a. Numérique et société	109
b. Implication du CEA dans les standards et la normalisation	111
c. Visibilité du CEA	114



Annexe I – Résumé des compétences par domaine	115
Les compétences dans le domaine de l'IA	115
Les compétences dans le domaine de l'ingénierie système	115
Les compétences dans le domaine des capteurs	116
Les compétences dans le domaine de l'IHM	118
Les compétences dans le domaine du calcul	118
Les compétences dans le domaine de la robotique/cobotique	119
Les compétences dans le domaine des matériaux	120
Les compétences dans le domaine de l'énergie	121
Les compétences dans le domaine de la cybersécurité	122



Annexe II – Plateformes utilisées par domaine	124
Plateformes utilisées dans le domaine de l'IA	124
Plateformes utilisées dans le domaine de l'ingénierie	125
Plateformes dans le domaine des capteurs	126
Plateformes dans le domaine de l'IHM	128
Plateformes dans le domaine du calcul	129
Plateformes dans le domaine de la robotique/cobotique	129
Plateformes dans le domaine des matériaux	130
Plateformes dans le domaine de l'énergie	131
Plateformes dans le domaine de la cybersécurité	134



Annexe III – Liens des enjeux du numérique avec les mailles	135
--	------------

EXECUTIVE SUMMARY

Le message de la mission numérique (MN) est simple : le numérique est un enjeu international de compétitivité, de souveraineté et de vie sociale ; le CEA est en mesure de jouer un rôle national pour en maîtriser plusieurs technologies essentielles et les transférer à l'industrie et au monde scientifique. Le rapport se déroule en deux parties :

- Des éléments de contexte, une vision du numérique du futur, un état des lieux du numérique au CEA et sa cohérence d'ensemble (Chapitres 1 à 4)
- Puis des recommandations portant sur les axes d'excellence à développer, les adaptations de modes de fonctionnement, les partenariats, les standards et les relations numérique et société (Chapitres 5 à 8)

Contexte : Le numérique est au cœur des impulsions de l'Etat visant à miser sur l'innovation de rupture pour le futur de l'économie nationale. La Loi de programmation de la recherche (LPR), le plan France Relance et le PIA4 soutiennent la transition numérique¹.

La stratégie de la Commission européenne « Façonner l'avenir numérique de l'Europe », se déclinera autour : (1) Des technologies du numérique au service des citoyens, (2) Une économie numérique équitable et compétitive, et (3) Une société numérique ouverte, démocratique et durable.

Vision : le numérique du futur pourrait suivre de grandes tendances :

- parfaire la continuité du monde numérique en situation nomade et résidentielle ;
- avec un rôle déterminant des interfaces entre l'usager et le monde virtuel : elles vont évoluer profondément pour superposer en permanence un espace virtuel à l'espace physique ;
- le numérique va transformer le logement, les modes et espaces de travail, la santé, les usines, la science ;
- la transition énergétique et la transition médicale seront numériques ;
- l'internet des objets va exploser et sous-tendre toutes ces transformations ;
- les nouveaux matériaux font l'objet d'une compétition aiguë ;
- les technologies transversales seront omniprésentes : IA embarquée, cybersécurité, jumeau numérique ;
- le socle hardware du numérique : capteurs et calcul sont un enjeu de souveraineté et de frugalité.

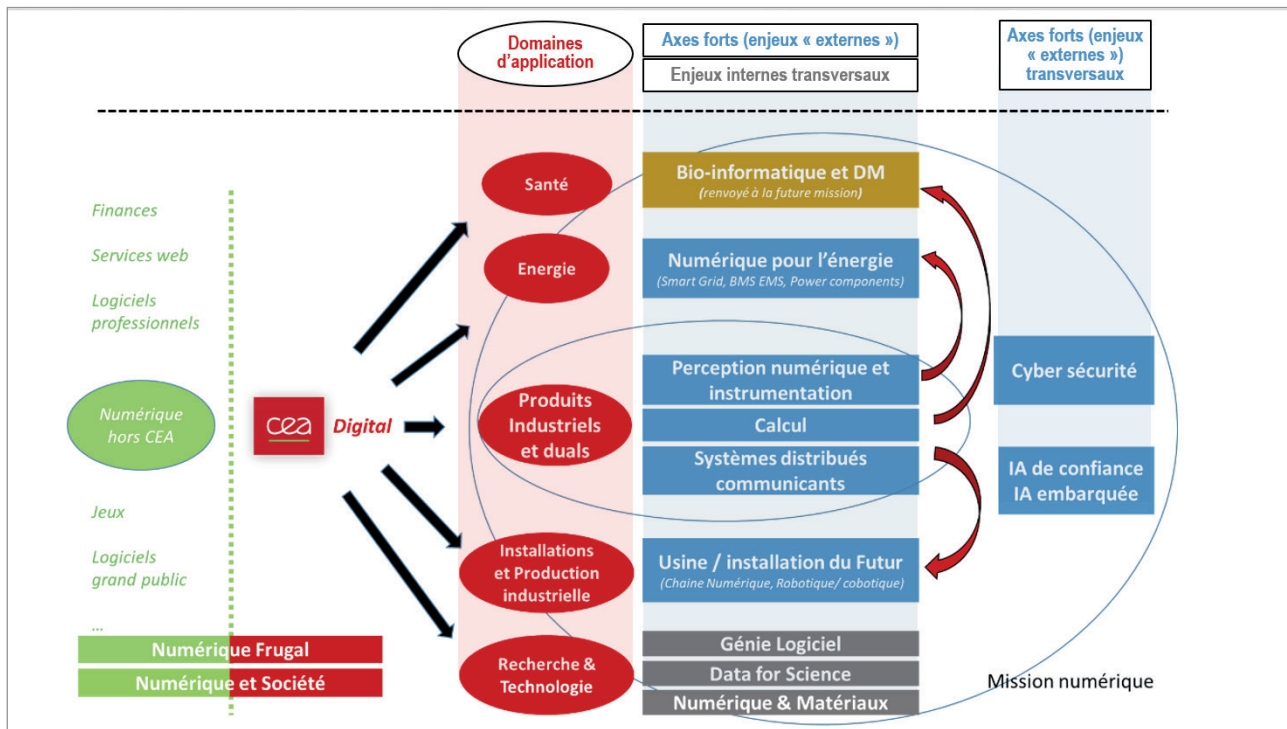
Etat des lieux, cohérence : le CEA compte plus de 3 000 scientifiques dans le domaine numérique, répartis assez régulièrement en 9 domaines de compétence : IA, ingénierie des systèmes, capteurs, IHM, calcul, robotique, matériaux, énergie, cybersécurité. Ils disposent de plus de 50 plateformes à l'état de l'art industriel ou scientifique. INRIA, le CNRS, et le CEA sont complémentaires et couvrent à eux trois une large part du champ du numérique en France. Les composantes du CEA forment un tout cohérent dans le champ du numérique avec :

- Une recherche fondamentale autonome liée par les concepts aux enjeux du numérique ;
- Une recherche amont intégrée aux feuilles de route numériques ;
- Un continuum riche avec la recherche technologique ;
- Une bonne couverture de la chaîne de valeur du composant au système en passant par le génie logiciel, le traitement massif et intelligent des données, le numérique pour les matériaux, les plateformes pour les composants.

¹: quantique, cybersécurité, enseignement numérique, santé digitale, 5G et futurs réseaux de communications, intelligence artificielle, cloud, verdissement, interfaces homme-machine (IHM) et robotique

Le numérique est au service des missions du CEA (il est le premier utilisateur de ses propres technologies numériques) dans le socle de recherche fondamentale, la transition énergétique, la médecine du futur, la défense et le calcul intensif.

Axes forts : la MN propose que le CEA s'investisse dans des axes forts, où il visera l'état de l'art international :



Modes de fonctionnement : la MN propose de prolonger la mission de son comité de pilotage pour assurer, pour le compte de la DG, la coordination et le suivi des actions qu'elle a suggérées. Celles-ci visent à fédérer et mobiliser une communauté d'expertise :

- animation *bottom up* d'une communauté de pratiques ;
- appui sur la structuration en mailles des programmes ;
- plateformes mutualisées au niveau de l'organisme pour le génie logiciel, la conception numérique de matériaux, le traitement de données scientifiques massives ;
- *moonshots* ;
- recherche *blue sky* ;
- qualité du recrutement.

Partenariats et standards : la MN recommande des partenariats structurants aux niveaux académique et industriel, national et international. Ils sont indispensables au regard de l'ampleur des recherches à conduire. Elle recommande également une implication plus forte du CEA dans les normes et standards basée sur une approche stratégique solide.

Numérique et société : La MN préconise de doter le CEA d'un comité opérationnel d'éthique sur le numérique, renforcer l'animation et le dialogue interne ainsi que la collaboration avec les SHS, s'interroger sur la participation du CEA au débat public, valoriser les activités de diffusion de la culture scientifique et technique, et investir de nouvelles formes de communication.

RECOMMANDATIONS DE LA MISSION NUMÉRIQUE

a. Choisir et afficher les axes forts du CEA dans le numérique

Recommandation n°1 : La Mission numérique (MN) recommande que le CEA structure son action et sa communication autour de neuf axes forts du numérique, reconnus comme des enjeux majeurs, dans lesquels il possède une compétence distinctive, structurant ainsi une communauté numérique interne forte.

Ces axes d'excellence permettent d'aborder des domaines d'application variés : Santé, Energie, Produits industriels et duals, Installations scientifiques et production industrielle (usine du futur). Le cœur formé par le triptyque perception numérique, calcul, et systèmes distribués communicants & intelligents irrigue l'ensemble de ces axes, et les axes cyber sécurité et IA de confiance sont transversaux à toutes les applications

- Axe 1 — Solutions matérielles et logicielles pour accompagner les différentes voies du calcul (HPC, low power, dédié IA, quantique...) : volets technologique et architecture
- Axe 2 — Systèmes de calcul distribués communicants : communications quantiques, réseaux et télécommunications, systèmes répartis
- Axe 3 — Perception numérique, capteurs avancés et instrumentation : l'instrumentation scientifique, Interface Homme Machine (IHM), capteurs industriels
- Axe 4 — IA de Confiance, IA embarquée : algorithmes, performances et de la confiance, architectures de circuits, composants et technologies
- Axe 5 — Cyber sécurité : technologies et outils pour sécuriser les composants clés des industries de sécurité et de la défense (IA, connectivité, calcul massif)
- Axe 6 — Usine et Installation du futur : robotique, jumeau numérique, fabrication additive
- Axe 7 — Numérique au service de la transition énergétique : briques énergétiques « augmentées », électronique de puissance et de pilotage des moteurs électriques, architectures modulaires et multi-niveaux, réseaux énergétiques intelligents
- Axe 8 — Numérique frugal et durable : écoconception, normes, labels, impact de la réglementation sur l'empreinte environnementale du numérique
- Axe 9 — Numérique pour la médecine du futur : bioinformatique, médecine numérique, dispositifs médicaux (cet axe n'est pas approfondi dans ce rapport car la réflexion plus générale sur la médecine du futur, à venir, a vocation à le préciser et l'enrichir)

Recommandation n°2 : La MN recommande de cultiver la présence du CEA sur toute la chaîne de la valeur (du composant au système) et la diversité de ses activités de recherche, des plus fondamentales aux plus appliquées, dans une continuité structurée. La mise en synergie maximale de ses compétences sera un atout différenciant au regard des besoins du numérique. Elle pourra se traduire notamment, dans le respect des spécificités des

différentes natures d'activité, par un alignement des feuilles de route entre recherche amont et technologique.

Recommandation n°3 : La MN relève les apports essentiels du numérique à tous les champs de recherche du CEA. Elle recommande de soutenir une communauté numérique interne bien organisée, ressource indispensable à l'ambition scientifique du CEA dans les trois transitions.

- Le numérique, technologie capacitante pour le socle de recherche fondamentale du CEA
- Le numérique au service des missions du CEA dans la transition énergétique
- Le numérique au service des missions du CEA dans la transition numérique
- Le numérique comme technologie habilitante de la médecine du futur
- Le numérique au service des missions du CEA dans la défense
- Une articulation naturelle de la mission numérique avec le numérique intensif



b. Adopter des modes de fonctionnement adaptés aux exigences du numérique, plus transversaux et plus agiles

La MN a relevé le besoin d'accentuer le partage des pratiques, des compétences, des savoirs, des visions au sein des chercheurs mobilisés, et leur volonté de faire partie d'un collectif actif et dynamique. Des modes de fonctionnement adaptés doivent permettre la mise en synergie maximale des compétences du CEA et la capitalisation des acquis.

Recommandation n°4 : La MN recommande pour répondre aux besoins de transversalités exprimés de créer des « communautés transversales d'experts » sur les axes forts préconisés par la mission et animées par leurs membres.

En s'inspirant d'actions déjà déployées par des entreprises et des études en SHS sur le sujet, la MN préconise 10 actions pour commencer à activer et faire vivre ces communautés, suivant des principes fondateurs : volonté de susciter l'adhésion par une démarche participative, de limiter la lourdeur en rendant facile l'interaction, de garder une certaine transparence de l'information et une capacité de brassage d'idées efficace. L'équipe d'animation sera constituée à partir du volontariat : un sondage en a montré la faisabilité. La communauté utilisera un environnement logiciel comme Talkspirit.

Recommandation n°5 : La MN préconise la création de plateformes collaboratives mutualisées à l'échelle de l'organisme.

Les activités de génie logiciel, Data for Sciences et numérique pour les matériaux, répondent d'abord aux besoins internes de nombreuses activités de recherche du CEA, mais peuvent aussi devenir un marqueur différenciant. Elles mobilisent des compétences pointues et convoitées, des investissements récurrents. La MN propose de les mutualiser pour atteindre plus facilement l'excellence.

- **Partage de développement logiciel** : la plateforme *DeepLab* fournira à la communauté des développeurs de systèmes numériques complexes des outils d'homogénéisation, de meilleures connaissances mutuelles et de partage, pour améliorer la qualité et la vitesse de développement, capitaliser les logiciels et éviter de re-développer ce qui existe déjà.
- **Gestion des données avec les outils et les compétences associées en science de la donnée** : Cette plateforme d'exploitation des données scientifiques du CEA (dont le volume dépasse de plus en plus les capacités de traitement « classiques ») offrira des outils d'intelligence artificielle, de visualisation des données... et des conseils de mise en œuvre, tout en respectant les règles de cybersécurité et de confidentialité
- **Mutualisation des actions et des outils métiers numériques dans le domaine des matériaux** : Dans le prolongement des actions Focus « Expérimentation numérique et Jumeau numérique » ou « Simulation pour les batteries », cette approche vise à supporter les principales feuilles de route matériaux, à mettre au point des briques de simulation communes en lien fort avec la caractérisation, pour constituer progressivement un outil de référence pour la conception numérique de matériaux « intentionnels » c'est-à-dire aux propriétés prédéterminées.



c. Mobiliser en interne et en externe avec des projets vitrines

Recommandation n°6 : La MN préconise le lancement de projets incitatifs dits « *Moonshots* », afin d'augmenter la visibilité du CEA sur ses axes forts et de fédérer des équipes transversales en mode projet, en accélérant la maturation de sujets porteurs.

Un « *moonshot* » est défini comme un démonstrateur à finalité de rupture scientifique ou technologique, réalisable en 18 à 36 mois, sous la forme d'un objet ou d'une expérience exposable et accessible à un public large. Une vingtaine d'exemples a été listée.

En s'inspirant du REX sur les projets « plan de couplage » la MN propose de retenir 3 éléments essentiels à la réussite de ces projets :

- Une organisation agile, réduite et éphémère via un mode de fonctionnement en laboratoire virtuel délocalisé;
- L'accès aux moyens nécessaires via le partage d'équipements ou l'accès privilégié à de grands instruments ou à des plateformes communes (PFNC, salles blanches...);

- Un suivi jalonné à haut niveau, transversalement par les DO avec une périodicité trimestrielle par exemple, et par la direction générale annuellement.

Recommandation n°7 : La MN propose d’explorer dans certains domaines très spécifiques des concepts et des idées de ruptures, grâce à des projets exploratoires « *blue sky* » spécifiques associant recherche fondamentale et recherche technologique.

Au-delà des recherches fondamentales amont et des recherches appliquée et partenariale dont l’objectif est de répondre à des questions s’inscrivant dans des feuilles de route technologiques et scientifiques, la recherche exploratoire dite aussi « *blue Sky* », mue par la curiosité et les grands défis pour les sciences et les technologies peut permettre d’inventer au CEA des voies originales pour traiter des objectifs fondamentaux comme la frugalité du numérique ou les organes artificiels.



d. Confier le suivi des actions au comité de coordination de la MN

Recommandation n°8 : La MN recommande la pérennisation du comité de coordination pour assurer dans la durée le suivi des actions proposées et la coordination de l’ensemble des acteurs mobilisés, en lien avec les autres dispositifs de pilotage en place (DFP pour les mailles, HPC, inflexions, etc.).

Le comité de coordination copiloté DRT/DRF est composé des représentants des quatre DOs ainsi que quelques experts, un représentant du cab AG et un représentant de la DFP. Il invite en tant que de besoin, des représentants des directions fonctionnelles : DRI/DAE pour les actions Europe, DIR Valo pour le benchmark, DSI pour les outils logiciels, DCOM pour la communication. Les décisions sont prises par consensus. Ce choix est une façon de responsabiliser les DO vis-à-vis du succès des axes du numérique, dans un mode où toutes sont concernées directement, et de les mettre en situation de devoir se coordonner en permanence, avec un canal efficace. La mission du comité comporterait notamment les points suivants :

- **Suivre la mise en place puis le fonctionnement des communautés d’experts** afin d’assurer leur pérennité et adaptation aux besoins stratégiques. Instruire les projets de **plateformes mutualisées** jusqu’à leur mise en place après validation par la DG, puis effectuer leur suivi. Instruire pour la DG le **dispositif des actions Moonshot et blue sky**, organiser le processus de sélection et le reporting d’avancement.
- **Proposer à DFP/DPG les évolutions de l’organisation en maille qui seraient nécessaires.** La transition numérique se décline aujourd’hui en trois mailles : la microélectronique, les systèmes numériques et la cybersécurité. Pour les programmes impliquant plusieurs DO, le comité de coordination fournira un espace permanent et bien rodé pour le suivi des projets inter-DO structurants, pour traiter les inévitables difficultés, saisir de nouvelles opportunités, définir des actions pour s’adapter à la réalité des projets.
- **Coordonner pour la DG les propositions relatives au positionnement du CEA vis-à-vis des stratégies nationales.** Veiller à la mise en place d’un suivi commun des projets inter-DO structurants comme les inflexions ou les PEPR mais aussi en créant un lieu

permanent d'échanges pour faire face à d'éventuelle difficultés ou pour saisir de nouvelles opportunités et pour décider ou proposer des actions ou des évolutions analysées comme nécessaires pour s'adapter à la réalité des projets. Veiller à une coordination de positionnement opérationnel sur des programmes nationaux ou européens

- Collecter les besoins et proposer des pistes pour **attirer et retenir les talents** dans le domaine du numérique, dans une situation concurrentielle forte
- Réaliser en tant que de besoin le travail de **coordination de positionnement opérationnel** sur des programmes nationaux ou européens sur sollicitation de la DG. De la même manière en cas de sollicitation sur des opportunités de valorisation ou de partenariats externes structurants



e. Stimuler les partenariats académiques et industriels essentiels

Recommandation n°9 : La MN préconise un partenariat majeur avec le CNRS et Inria visant à couvrir ensemble une majorité du champ de la recherche nationale en numérique et notamment à adresser les grands programmes comme le quantique, l'IA de confiance ou la cyber sécurité. Il sera complété par les accords de site notamment avec les Universités Paris Saclay et Grenoble-Alpes ainsi qu'avec un grand nombre de laboratoires dans tout le territoire sur des sujets ponctuels.

Recommandation n°10 : La MN recommande une présence active dans les grands réseaux et initiatives européennes en conformité avec la montée en puissance des programmes d'Horizon Europe et avec la nécessité de porter certains sujets (comme la microélectronique) au plan européen pour faire face à la compétition internationale.

Recommandation n°11 : La MN recommande sur le plan international de développer des collaborations privilégiées, déjà bien engagées, avec des grandes universités leaders dans le numérique (Stanford, MIT, Berkeley).

Recommandation n°12 : La MN a listé les partenaires industriels nationaux et internationaux majeurs avec lesquels le CEA doit mener des travaux de coopération dans la durée, afin de développer ses technologies à l'état de l'art mondial.

Recommandation n°13 : La MN préconise que le CEA soit en situation de choisir le mode de maturation d'une technologie le plus approprié pour la rapprocher du marché entre plusieurs voies alternatives :

- Coopération multilatérale;
- Partenariat bilatéral;
- Affiliate program;
- Startup;
- Véhicule industriel dédié;

et qu'il professionnalise au maximum son approche dans chacune de ces voies.

Recommandation n°14 : La MN préconise la prise en compte, organisée et de bon niveau, des questions liées aux environnements de développement, aux standards, à la visibilité des licences, aux benchmarks et à la normalisation.



f. Favoriser une insertion responsable du numérique dans la société et accroître la visibilité du CEA dans ce champ

Recommandation n°15 : La MN préconise de doter le CEA d'un comité opérationnel d'éthique du numérique, pour mieux prendre en compte les questions éthiques et sociologiques liées au progrès des technologies et à leur diffusion.

Les technologies du numérique et les usages qui en découlent changent notre société de manière profonde et systémique. Elles bouleversent les modalités des rapports sociaux, le fonctionnement de la société et celui du monde du travail :

- Comment garantir la protection et la sécurisation des données personnelles ?
- Quel impact sur le monde du travail ?
- Les usages du numérique, notamment à travers les réseaux sociaux peuvent-ils conduire à la dissolution du contrat social ?
- Quelle réaction face à des objets technologiques dont les performances, et en particulier l'intelligence nous dépassent ?
- Quel usage sera fait de ces technologies ?
- Quel sera l'impact environnemental du déploiement de ces technologies ?

Recommandation n°16 : pour la bonne prise en compte de la problématique Numérique et Société, la MN recommande de mettre en place quatre axes de travail :

- Renforcer l'animation (ateliers, séminaires...) et le dialogue interne ainsi que les compétences du CEA en sciences humaines et sociales (SHS), en s'appuyant sur les compétences internes et sur des collaborations avec des laboratoires externes spécialisés en SHS;
- S'interroger sur les modalités d'une participation des chercheurs du CEA au débat public;
- Valoriser les activités de diffusion de la culture scientifique et technique;
- Investir de nouvelles formes de communication.

Recommandation n°17 : Compte tenu du décalage entre l'implication du CEA sur le numérique et sa visibilité sur le sujet, la MN recommande la mise en place d'un plan d'action spécifique sur la mise en visibilité du CEA.

La notoriété du CEA dans le champ numérique n'est pas encore à la hauteur de son potentiel. Ce décalage est sans doute dû au fait qu'une partie de ses actions est couverte par la confidentialité industrielle. La mission recommande un effort spécifique pour le corriger. Les modalités devront faire l'objet d'un travail avec les directions compétentes. La Mission numérique formule quelques suggestions d'actions complémentaires des recommandations précédentes qui contribueront au renforcement de la visibilité du CEA.



PRÉAMBULE

a. Objet de la mission

Les objectifs de la mission numérique ont été définis dans une lettre de mission de l'Administrateur Général du CEA en date du 14 Février 2020. Le présent rapport rassemble les principales conclusions et propositions issues du travail d'environ 300 experts appartenant à toutes les directions du CEA. Il est complété de nombreuses annexes. Il a été rédigé par les membres du comité de pilotage composé de :

Responsables mission

- Stephane SIEBERT (DRT) avec Pascale BAYLE GUILLEMAUD (DRF)

Membres comité de pilotage

- Philippe CHOMAZ & Vincent LEBON (DRF)
- Jean-Francois CLOUET & Jacques-Charles LAFOUCRIERE (DAM)
- Cyril MOITRIER & Xavier RAEPSAET (DES)
- Jean-Philippe BOURGOIN (DRT) & Emilie VIASNOFF (DRT)
- Emmanuel SABONNADIÈRE & Alexandre BOUNOUH (DRT)
- Jeanne MARCUCCI DE LA BRELIE (Cab-AG)
- Neil ABROUG (DPG)

Sherpa/experts (contribution DRT)

- Ahmed JERRAYA
- Jean-René LÉQUEPEYS
- Jean-Noël PATILLON

Le périmètre de la mission est un sujet complexe, dans la mesure où le numérique est maintenant présent dans la quasi-totalité des travaux de recherche. La lettre de mission précisait ainsi que les outils numériques au service des activités quotidiennes de l'organisme ne faisaient pas partie de l'objet de la mission, de même que l'usage des technologies numériques au profit de problématiques scientifiques comme le climat ou la modélisation.

Nous sommes convenus de considérer qu'entraient dans le champ de la mission les activités numériques susceptibles de donner lieu à une valorisation sous forme de brevet ou de savoir-faire transférés à nos partenaires industriels. En font partie bien entendu les composants numériques (matériels et logiciels), mais aussi les cas où le numérique est le différenciateur et non la compétence métier intrinsèque (à l'instar des modèles météo par exemple). Par extension, les technologies numériques « ancillaires » et génériques développées dans les labos au service des grands outils et codes scientifiques ont été incluses dans le périmètre.

Des frontières avec d'autres missions ont été bien identifiées :

1. La mission HPC confiée à JP DURAUD sur l'usage du HPC porte plutôt sur l'organisation des travaux au CEA et constituera une donnée d'entrée du rapport. La R&D sur les technologies pour les calculateurs HPC entre en revanche bien dans le périmètre de la mission numérique.
2. La mission santé, confiée à Elsa CORTIJO, doit démarrer après la mission numérique. Nous avons essayé de mentionner à titre conservatoire les activités numériques pour la santé, mais elles ont vocation à être enrichies par la mission santé.

Le plan du rapport a été établi d'après les consignes de la lettre de mission, qui prévoyait des actions du CEA tournées vers l'extérieur et tenant compte du contexte industriel et académique, des actions internes au profit des autres missions de recherche et des aspects de fonctionnement interne pour s'adapter aux exigences du numérique actuel. Les différents livrables figurent dans le rapport et ses annexes.



b. Déroulement de la mission – démarche de co-construction

La mission numérique a débuté en février 2020 et s'est organisée pendant une année autour du comité de pilotage. Ce comité, organe central de la mission numérique, s'est très régulièrement réuni, essentiellement en visio conférence, mais néanmoins, pour des phases importantes de travail, en présentiel à l'automne quand les restrictions sanitaires COVID l'ont permis. La lettre de mission recommandait une démarche participative pour une co-construction avec les acteurs du numériques du CEA. Nous avons opté pour une organisation en groupes d'experts nommés par les DOs, ainsi cette mission a réuni près de 300 experts, un site web interne présente la mission et ses étapes, et une adresse email générique a été ouverte. Une présentation en visio ouverte à l'ensemble des personnes travaillant dans les laboratoires du CEA a été organisée à mi-parcours. La crise sanitaire ne nous a cependant pas permis, à l'instar de la mission Energie, d'organiser des séminaires dans l'ensemble des centres CEA pour présenter et discuter avec les salariés.

Ahmed Jerraya a été la cheville ouvrière de cette mission et a investi beaucoup de temps et d'énergie pour coordonner l'ensemble des actions, assurer un contact constant avec les animateurs des GTs.

La mission s'est déroulée en plusieurs phases :

- **Mars — Juin** : Benchmark industriel et académique, état des lieux/recensement des DOs, Analyse EU, Bibliométrie, nomination des experts : travail effectué en grande partie par le SBEM, les cellules EU des DOs, et les représentants des DO au comité de pilotage.
- **Juin — Septembre** : Les compétences clefs du CEA sur le numériques ont été classées en 9 domaines et en conséquence les experts ont été distribués en 9 Groupes de travail (GT compétences). Ils ont réalisé une analyse critique du positionnement du CEA (périmètres, ressources PF, tendance mondiale dans le domaine, points forts, à améliorer, interaction entre GT, positionnement, thèmes émergents...). En Juillet 2020, un séminaire en présentiel bi-site avec l'ensemble des experts a été organisé entre Saclay et Grenoble comme point d'étape, avec des ateliers d'échange entre experts des GT — Suite à ce séminaire, les GT ont travaillé sur une vision prospective, et ont proposé 28 axes structurants de développement. Ils ont rendu un rapport de synthèse en septembre.
En sus de ces 9 groupes, la MN s'est appuyé sur deux autres groupes : un groupe de 10 experts Seniors ou Référents ayant la capacité d'analyse globale des propositions des GT, et un groupe « Jeunes » de 12 experts de moins de 40 ans, pour apporter une vision contemporaine du numérique et de ses enjeux. Ces deux groupes ont aussi présenté un rapport de cette première phase.

- **Septembre — octobre** : Le comité de pilotage a analysé les rapports des GT compétences et les axes structurants proposés afin de définir les grands Enjeux pour le CEA dans le numérique. Ainsi 7 enjeux externes et 3 enjeux internes ont pu être définis permettant de paver les grands domaines dans lesquels le CEA est un acteur significatif, avec des capacités et les ressources pour proposer des innovations disruptives (ceux-ci seront décrits plus loin dans ce rapport).
En sus de ces 10 enjeux, le comité de pilotage a constaté qu'il était indispensable, en s'appuyant sur deux autres GT transversaux, d'analyser l'impact environnemental et l'obligation de frugalité numérique, ainsi que le lien du numérique avec la société.
Le 13 octobre un point d'étape de la mission numérique a été présenté à la Direction générale du CEA.
- **Octobre — Janvier** : Les 200 experts ont été répartis dans les nouveaux GT Enjeux, et ont analysé les aspects suivants : importance de l'Enjeu pour le CEA, tendance, ruptures, forces; opportunités, benchmark, bénéfices attendus, point faibles à surmonter. Ils ont proposé un plan d'action pour permettre au CEA de se placer durablement à l'état de l'art du domaine, comprenant une feuille de route scientifique et technologique, une analyse des partenariats, des propositions de projets *Moonshot*; Ils ont rendu leur rapport fin janvier.
Le 20 novembre, afin d'étendre la réflexion à l'ensemble des collaborateurs travaillant au sein du CEA, une présentation directe en visio conférence a été organisée (450 personnes connectées et près de 1 400 vues en replay). Après une présentation de la structuration et du positionnement de la MN, 10 films de 4 minutes ont décrit chacun des Enjeux. Ensuite, 10 salles visio séparées ont été organisées pour chacun des Enjeux – chacun des auditeurs pouvant choisir le thème lui correspondant -. Ces séances d'une heure ont permis aux experts animateurs des GT de discuter avec des collègues, et enrichir leur travail de synthèse, ou prendre de nouveaux contacts.
- **Février-Mars** : le copil a rédigé ce rapport de synthèse et de conclusions de la mission numérique. Début avril, le rapport de conclusion et l'ensemble des documents produits par la mission ont été présentés à l'administrateur général.

L'ensemble des documents fournis est constitué du présent document (intitulé « rapport de synthèse de la mission numérique »), et de 3 annexes externes :

1. Annexe E1 : Les 12 rapports des groupes de travail Enjeux
2. Annexe E2 : Description des 21 *Moonshot* proposés par les experts
3. Annexe E3 : Extrait des rapports préliminaires de la mission numérique couvrant :
 - a. L'analyse du contexte européen;
 - b. Une étude bibliométrique et benchmark académique du CEA dans les domaines du numérique;
 - c. Un benchmark des activités du CEA vis-à-vis des tendances industrielles.



1. ÉLÉMENTS DE CONTEXTE, POSITIONNEMENT ET BENCHMARK DU CEA

Résumé

Le numérique est un levier important de l'ambition de la France en matière d'innovation et de souveraineté industrielle. Au cours des trois dernières années, plusieurs impulsions ont été données par l'Etat pour fournir un cadre à la dynamique de la transition numérique au plan national (Tech for good, plan DeepTech, loi de programmation de la recherche (LPR)). Elle se concentrera sur 22 marchés clés, dont 10 prioritaires, dans un contexte d'accélération de la politique industrielle et d'innovation suite à la crise sanitaire.

Parallèlement, l'Europe développe une politique volontariste sur les enjeux du numérique s'appuyant sur divers programmes. Une synthèse de documents traitant de la stratégie européenne dans le domaine du numérique a mis en lumière les axes de recherche prioritaires et étudié la manière dont le CEA peut y contribuer par ses compétences scientifiques, technologiques et ses capacités à diffuser les technologies. Cette stratégie se décline autour de trois axes principaux : le numérique au service des citoyens, de l'économie et de la planète.

Pour la communauté académique, le numérique joue un rôle très spécifique car il est à la fois objet et outil de recherche, la science des données et l'intelligence artificielle étant désormais considérées comme la quatrième révolution en matière de découverte scientifique (après l'observation, la théorie, la simulation numérique). L'ensemble de la chaîne de la valeur de la donnée mesurée ou calculée est au cœur de l'ensemble des recherches expérimentales, cliniques ou observationnelles ainsi que d'une grande partie des travaux théoriques.

Le CEA est l'un des rares acteurs du numérique mondial portant à haut niveau les principales modalités de recherche en numérique, avec à la fois une recherche fondamentale exploratoire reconnue internationalement, une recherche fondamentale amont bien couplée aux feuilles de routes technologiques, une recherche technologique à l'impact incontesté et des communautés scientifiques dans des domaines leaders dans l'utilisation des outils du numérique et le co-développement au-delà de l'état de l'art.

a. Un contexte national qui identifie dans le numérique un levier important de l'ambition de la France en matière d'innovation et de souveraineté industrielle

Le numérique au cœur des impulsions de l'Etat misant sur l'innovation de rupture pour le futur de l'économie nationale.

Au cours des trois dernières années, plusieurs impulsions de l'Etat, relevant des domaines de la recherche, de l'innovation et de l'industrie, ont été données pour faire de la France un des leaders de l'innovation de rupture : elles fournissent un cadre à la dynamique de la transition numérique au plan national. Parmi ces impulsions figurent notamment, les initiatives Tech for good, le plan Deeptech, la loi de programmation de la recherche, le plan d'action pour transformer notre industrie par le numérique et le pacte productif qui trouve son prolongement dans les stratégies d'accélération du PIA4 et le volet compétitivité du plan de relance.

L'impulsion *Tech for good*² donnée par le président de la République est née du constat que la technologie, notamment numérique, a permis des progrès majeurs mais nécessite une attention et un engagement de ses acteurs pour éviter les éventuelles dérives et développer dynamiquement un cadre éthique approprié. La stratégie nationale en intelligence artificielle lancée en mars 2018 dans la lignée du rapport Villani en est un exemple en mettant l'humain au centre de la stratégie³.

Le plan *Deeptech* dont la mise en œuvre a été confiée à Bpifrance, sous le contrôle du Conseil de l'innovation, a été lancé en janvier 2019 pour faire de la France un acteur majeur de l'innovation de rupture à l'échelle internationale. Ce plan, doté initialement de 2,5 milliards d'euros sur cinq ans comporte trois volets majeurs : stimuler la création avec un objectif annuel de 500 startups *deeptech* créées, mobiliser massivement des moyens pour accompagner la croissance et construire les leaders industriels de demain, et dynamiser les écosystèmes d'innovation sur les territoires et par filières. Le numérique y tient une place très significative.

La loi de programmation de la recherche (LPR) vise à rompre avec le décrochage en cours de la recherche publique en France et à garantir par un réinvestissement significatif (25 milliards d'euros) sur la décennie 2021-2030 que la France revienne parmi les nations leaders et par effet de levier, atteigne 3 % du PIB investi en R&D dans le courant de la décennie. Votée fin 2020, la LPR a été construite sur une base non thématique mais identifie dans son travail préparatoire et dans le rapport annexé, plusieurs grands défis sociétaux à relever en matière de recherche et d'innovation et souligne le caractère indispensable du numérique pour ce faire.

Face au constat d'un retard à combler dans l'appropriation des **technologies de l'industrie du futur** par les entreprises françaises, le ministère de l'industrie a lancé en 2018 un plan d'action pour transformer les PME et les ETI par le numérique⁴, qui se traduit entre autres, par la mise en place de plateformes d'accélération de l'industrie du futur.

Dans le cadre de la **préparation du Pacte Productif**, le rapport «*Faire de la France une économie de rupture technologique*», a identifié 22 marchés clés, dont 10 prioritaires⁵. Ces

² : <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2020/12/01/tech-for-good-plus-de-75-leaders-sengagent>

³ : <https://www.aiforhumanity.fr/> || https://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/strategie_1A/60/7/mesri_1A_dep_A4_09_1040607.pdf

⁴ : <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/industrie/politique-industrielle/l-industrie-du-futur>

⁵ : <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/actualites/remise-du-rapport-faire-de-la-france-economie-de-rupture-technologique>

marchés conjuguent des bases technologiques et industrielles françaises solides et des réponses à des grands défis sociétaux, tels que : protéger l'environnement, être en bonne santé, mieux se nourrir ou garantir notre souveraineté (notamment numérique). Il s'agit également de répondre à une concurrence internationale intense qui menace notre économie de déclassement.

Une accélération de la politique industrielle et d'innovation suite à la crise sanitaire

La crise sanitaire et l'indispensable recours au numérique pour la résilience ont amené à revoir les priorités mises en avant dans le rapport Potier. Le plan France Relance présenté en septembre 2020 et le PIA4, d'une ampleur de 20 milliards d'euros voté en fin d'année 2020 confirment d'une part l'effet levier des mesures de soutien à la R&D pour une relance économique compétitive et durable dans un contexte global de grandes transitions et d'autre part le rôle clé de la maîtrise des technologies stratégiques pour la souveraineté. Une vingtaine de stratégies d'accélération sont ainsi mises en avant qui bénéficieront d'un soutien public de 12,5 milliards d'euros dans la cadre du volet dirigé du PIA4. Elles complètent les plans dédiés mis en place pour les filières automobiles et aéronautiques et tirent les leçons de la crise sanitaire en couvrant des domaines stratégiques pour les filières industrielles nationales, la transition écologique, mais aussi la transition numérique. Les technologies quantiques, la cybersécurité, l'enseignement numérique, la santé digitale, la 5G et plus largement les futurs réseaux de communications, l'intelligence artificielle — volet 2, le cloud et le verdissement du numérique, les IHMs et la robotique donnent lieu ou ont vocation à donner lieu à la mise en place d'une stratégie d'accélération⁶. Ces stratégies ont pour ambition de développer durablement l'activité industrielle au plan national : elles prévoient d'intervenir sur le volet recherche avec des Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) dont le pilotage est confié aux organismes nationaux⁷, sur le volet maturation, mais aussi en matière de démonstration et de déploiement, y compris pour les aspects liés aux compétences, qui représentent un enjeu majeur dans le domaine du numérique.

Enfin dans le prolongement du travail mené dans le cadre du Conseil national de l'industrie, et en résonance avec le besoin de résilience et de relocalisation d'activité industrielle, une filière dédiée aux machines et systèmes intelligents est en cours de constitution afin de renforcer les actions relevant de l'industrie du futur et développer la maîtrise nationale des technologies, notamment numériques, pour la compétitivité industrielle.

Le CEA a vocation à s'impliquer dans le cadre de ses missions et de ses domaines de compétences dans les politiques nationales mentionnées ci-dessus.



b. Un contexte européen d'amplification de l'action dans le domaine numérique

Le volontarisme européen en matière de numérique

L'Europe développe une politique volontariste sur les enjeux du numérique depuis au moins une décade avec une amplification dans le cadre financier pluriannuel 2021-27 qui s'appuiera sur deux outils :

⁶ : France Relance ; SGPI

⁷ : CEA, CNRS et Inria sont pilotes scientifiques des PEPR technologies quantiques et cybersécurité

- i. Le programme Horizon Europe, organisé autour de 3 piliers (excellence, compétitivité industrielle, innovation). Le pilier 2 « Défis mondiaux et compétitivité industrielle européenne » est organisé autour de 6 « *Clusters* » regroupant les orientations spécifiques et autour du Centre Commun de Recherche. Le cluster 4 « *Digital, Industry and Space* », doté de 15,3 milliards d’euros, regroupe les axes de recherche et développement des technologies clés numériques et le développement des plateformes existantes.
- ii. Le programme Digital Europe, axé sur le renforcement des capacités numériques stratégiques de l’Union Européenne et sur la facilitation d’un large déploiement des technologies numériques, utilisées par les citoyens et les entreprises européens. Avec un budget global de 7,5 milliards d’euros pour la période 2021-2027, le programme Digital Europe a pour but de façonner et de soutenir la transformation numérique de la société et de l’économie européenne⁸.

La stratégie européenne et le positionnement du CEA

Un groupe de travail de la mission numérique a produit une synthèse des documents européens⁹ traitant de la stratégie dans le domaine du numérique, qui met en lumière les axes de recherche et développement prioritaires et étudie la manière dont le CEA peut y contribuer par ses compétences scientifiques, technologiques et ses capacités à diffuser les technologies. Cette synthèse figure en annexe E3.

Au cours de la période 2021-2027, la stratégie de la Commission européenne dans le domaine du numérique, présentée en février 2020 dans le document de référence « Façonner l’avenir numérique de l’Europe », se déclinera autour de trois grands axes principaux : numérique **(1)** au service des citoyens, **(2)** au service de l’économie, et **(3)** au service de la planète. Pour chacun de ces axes, le groupe de travail a décliné les actions possibles pour le CEA, ses contributions majeures aussi bien dans l’exécution des programmes que dans l’anticipation et la préparation des programmes futurs. Les synergies éventuelles avec les actions structurantes françaises sont soulignées, et des recommandations sont proposées.

Le premier axe, précisément intitulé « Des technologies du numérique au service des citoyens » met en évidence, en particulier, l’intelligence artificielle, l’informatique en nuage et en périphérie (*cloud et edge computing*), les technologies de chaînes de blocs et de registres distribués (*Blockchain & Distributed Ledger Technologies*), le calcul haute performance (HPC), les technologies quantiques, la connectivité gigabit dont la 5G, la cybersécurité, l’internet des objets, la photonique, la micro et nanoélectronique, et la problématique générale de l’amélioration des compétences numériques. Ont été ajoutés à cette liste les systèmes cyber-physique et l’électronique flexible et imprimée. Le CEA est particulièrement impliqué dans les programmes relatifs au calcul haute performance, à l’intelligence artificielle, à la micro et nanoélectronique, aux infrastructures de communications, etc.

⁸ : <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/digital-europe-more-competitive-autonomous-and-sustainable-europe-brochure>

⁹ : CE : « Façonner l’avenir numérique de l’Europe » (Février 2020) || « Une nouvelle stratégie européenne pour l’industrie » (Mars 2020) || « Une stratégie européenne pour les données » (Février 2020) || « LIVRE BLANC Intelligence artificielle – Une approche européenne axée sur l’excellence et la confiance » (Février 2020) || « Artificial Intelligence for Europe » (Avril 2018) || https://ec.europa.eu/info/horizon-europe_en || <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/digital-europe-programme-proposed-eu75-billion-funding-2021-2027>

Le deuxième axe, intitulé « Une économie numérique équitable et compétitive », couvre deux domaines :

- iii. La stratégie de la Commission européenne en matière de données. Dans ce domaine, le CEA est impliqué dans les partenariats public-privé dans le *Big Data* et mène des actions qui contribuent à la création d'espaces européens communs de données (EOSC).
- iv. La politique de soutien à la numérisation de l'industrie européenne. Le CEA contribue à diffusion du numérique dans les entreprises et les PME, en étant impliqué dans des partenariats public-privés, tels que *Key Digital Technologies* ou *Made in Europe* ou encore Réseaux et services intelligents, dans les instituts européen d'innovation et de technologie (EIT), comme l'EIT Manufacturing, et dans l'établissement de réseaux européens de hubs d'innovation numérique (*Digital Innovation Hubs*).

Le troisième axe de la stratégie numérique de la Commission s'intitule « Une société numérique ouverte, démocratique et durable ». Ce volet recouvre d'une part la problématique de l'identité numérique des citoyens, où le CEA contribue à la réflexion, et d'autre part, dans une vision intégrée, la contribution du numérique aux secteurs de l'énergie et de la santé. La problématique énergétique et l'impact carbone, au cœur du pacte vert européen, est centrale pour les technologies numériques. Les actions structurantes du CEA relevant de ce domaine concernent les innovations numériques dans les domaines de l'hydrogène, des batteries, des réseaux et systèmes d'énergie, de la fabrication additive et de l'économie circulaire. Ce troisième axe décline aussi la transformation numérique du secteur de la santé et du système de soins, avec les priorités autour de l'interopérabilité des dossiers électroniques des patients, de la création d'un espace de données de santé partagé, et des outils numériques à la disposition des patients. Le CEA développe dans ce domaine, des actions portant sur les dispositifs médicaux, ou l'intelligence artificielle pour le traitement des données de santé par exemple.



c. Contexte académique et benchmark du positionnement du CEA

Le numérique à la fois objet et outil de recherche

Pour la communauté académique, le numérique joue un rôle très spécifique car il est à la fois objet et outil de recherche, la science des données et l'intelligence artificielle étant désormais considérées comme la quatrième révolution en matière de découverte scientifique (après l'observation, la théorie, la simulation numérique). Cette double dynamique peut être illustrée par les deux Prix Nobel d'Albert Fert pour ses travaux pionniers en spintronique et de Georges Charpak pour les premiers détecteurs électroniques pour la physique des particules.

Le développement du numérique s'appuie ainsi sur quatre modalités de recherche complémentaires :

- i. une recherche fondamentale « *blue sky* », mue par la seule curiosité sur tout ce qui touche aux concepts d'information ;
- ii. une recherche fondamentale formant la partie amont des feuilles de route du numérique ;

- iii. une recherche technologique au sein de ces feuilles de route, et qui a pour but de monter en maturité et de transférer les résultats au monde industriel;
- iv. une implication directe d'acteurs académiques utilisateurs de concepts et technologies numériques pour leurs projets de recherche et amenés à développer des solutions au-delà de l'état de l'art pour répondre aux besoins de ces projets.

Une recherche aux frontières de la connaissance sur l'information en physique et en biologie

La recherche exploratoire sur les dispositifs du numérique s'intéresse aux supports de l'information, aux lois de transformation et aux phénomènes remarquables associés ainsi qu'aux systèmes et dispositifs permettant de les mettre en évidence, de les étudier et de les maîtriser. Cette frontière de la connaissance est aujourd'hui représentée en physique par le quantique, et en biologie par les mécanismes du vivant à l'échelle moléculaire, impliquant notamment l'ADN et, au niveau système multi échelle, le cerveau et le système nerveux dans son ensemble. Ce volet lié au dispositif se double et se couple à un volet mathématique, informatique, théorique et conceptuel sur le traitement de l'information.

Des feuilles de route intégrant recherches amont et technologiques

Au niveau français ou européen ainsi qu'au niveau industriel les différentes technologies et applications du numérique sont structurées en feuilles de route. Ces feuilles de route peuvent être classées suivant la grille des compétences ou des enjeux identifiés pour cette mission. Elles sont au cœur des stratégies proposées. Elles demandent un effort important de recherche technologique associé à des recherches amont ciblées.

Des domaines de recherche académique en pointe dans l'utilisation du numérique

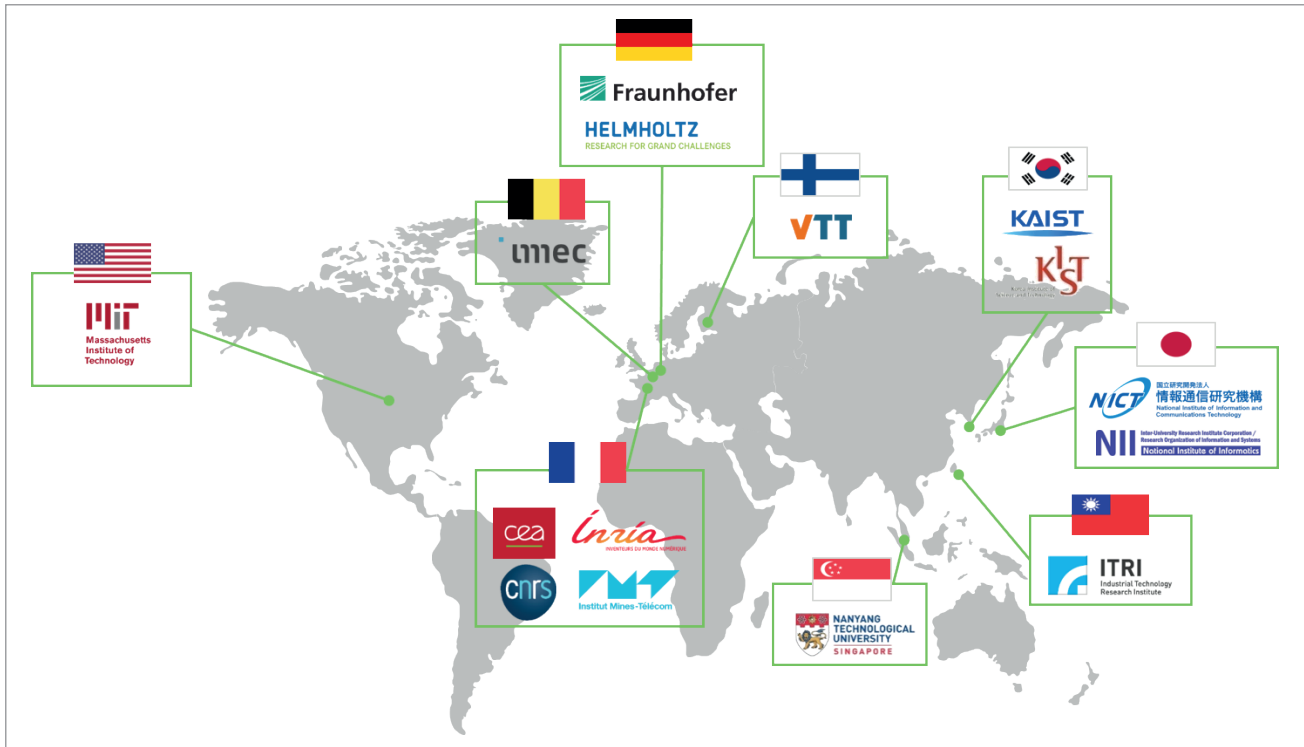
L'ensemble de la chaîne de la valeur de la donnée mesurée ou calculée est au cœur de l'ensemble des recherches expérimentales, cliniques ou observationnelles ainsi que d'une grande partie des travaux théoriques. Le numérique est une nécessité pour l'ensemble du monde académique. Les performances souhaitées allant souvent au-delà de l'état de l'art, nombre de communautés sont directement impliquées dans une R&D numérique ciblée en développant des outils et méthodes d'exception pour les besoins de leurs recherches. L'exemple le plus emblématique est probablement l'invention du WEB au CERN pour les besoins de la physique des particules. Aujourd'hui notamment l'astrophysique, les sciences de la terre, la physique des particules et la biologie développent des systèmes de mesures et de traitements avancés pour leurs données massives. Le climat, l'astrophysique et la physique quantique (physique nucléaire, chimie, matériaux...) demandent des calculs ultimes. L'ensemble de ces disciplines ne se contentent pas de repousser le numérique dans ses retranchements mais ont depuis longtemps construit une démarche de co-développement de leurs propres outils numériques matériels et immatériels.

Benchmark : le CEA, un acteur alliant les 4 dimensions de l'innovation numérique

Le CEA est l'un des rares acteurs du numérique mondial portant à haut niveau les quatre modalités de recherche en numérique mentionnées ci-dessus, avec à la fois une recherche fondamentale exploratoire reconnue internationalement, une recherche fondamentale amont bien couplée aux feuilles de routes technologique, une recherche technologique à l'impact incontesté et des communautés scientifiques dans des domaines leaders dans l'utilisation des outils du numérique et le co-développement au-delà de l'état de l'art.

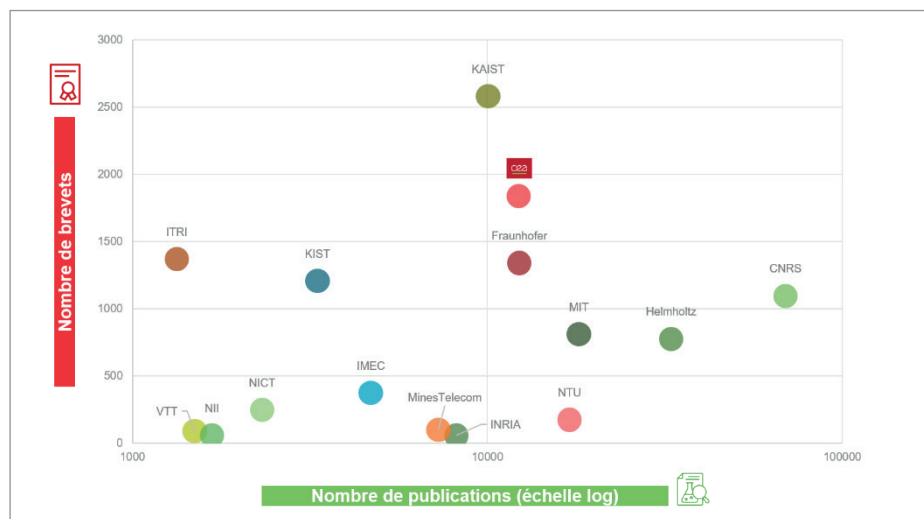
Un parangonnage du CEA avec 3 acteurs français du numérique et 11 acteurs internationaux, tous de haut niveau : 3 Allistene, 4 EUR, 1 US, 6 Asie a été réalisé par le Service Bibliométrie Etudes Marketing du CEA.

L'étude complète figure en Annexe E3.



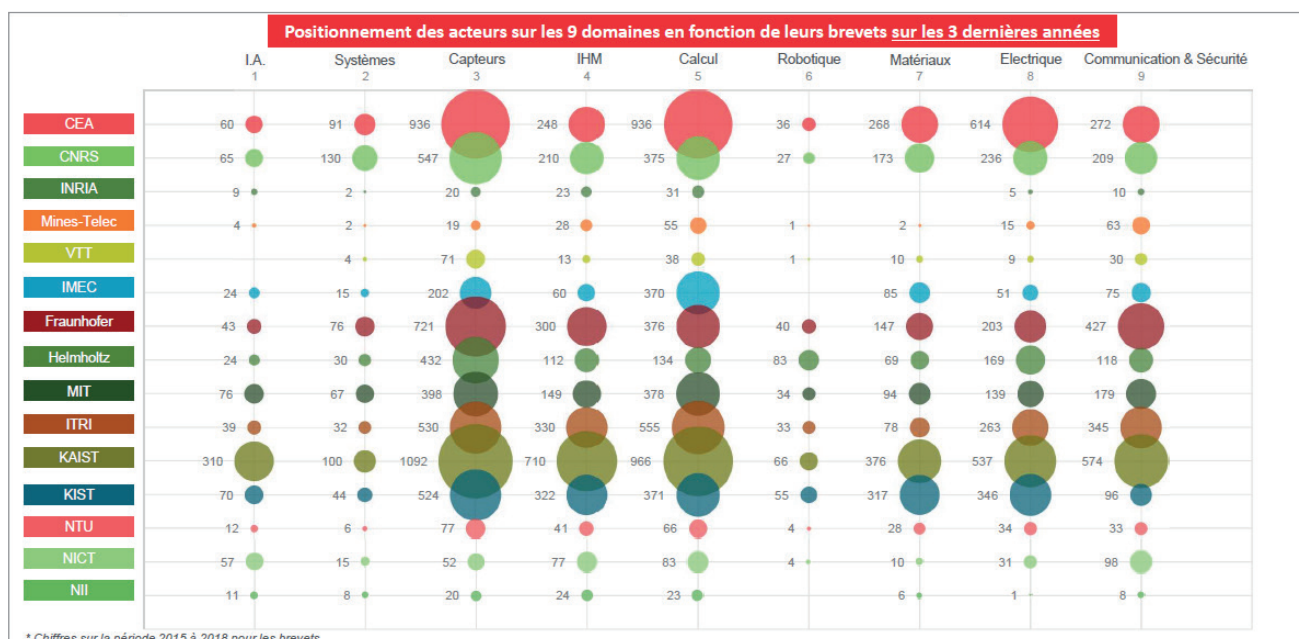
Une analyse des brevets et publications par domaine a été réalisée : IA, systèmes, capteurs, IHM, calcul, robotique, matériaux, électrique et communication et sécurité. En se focalisant sur les deux indicateurs des articles publiés et des brevets déposés pour couvrir à la fois le développement de connaissances et le développement de technologies, il ressort que le CEA mène bien de front ces deux volets avec de nombreux dépôts (63 % de son portefeuille) et de nombreuses publications (55 %) dans le domaine du numérique.

En considérant la volumétrie des brevets et des publications, le CEA et le Fraunhofer apparaissent proches sur les données intégrées depuis 2000 même si le CEA a accentué dans les dernières années son léger avantage en termes de brevets. Les deux organismes se singularisent en étant forts sur les deux tableaux des brevets et des publications. Le CEA se différencie du Fraunhofer par la force globale de sa recherche fondamentale impliquée dans le développement du numérique comme objet d'étude et comme outil au service d'autres domaines de recherche.

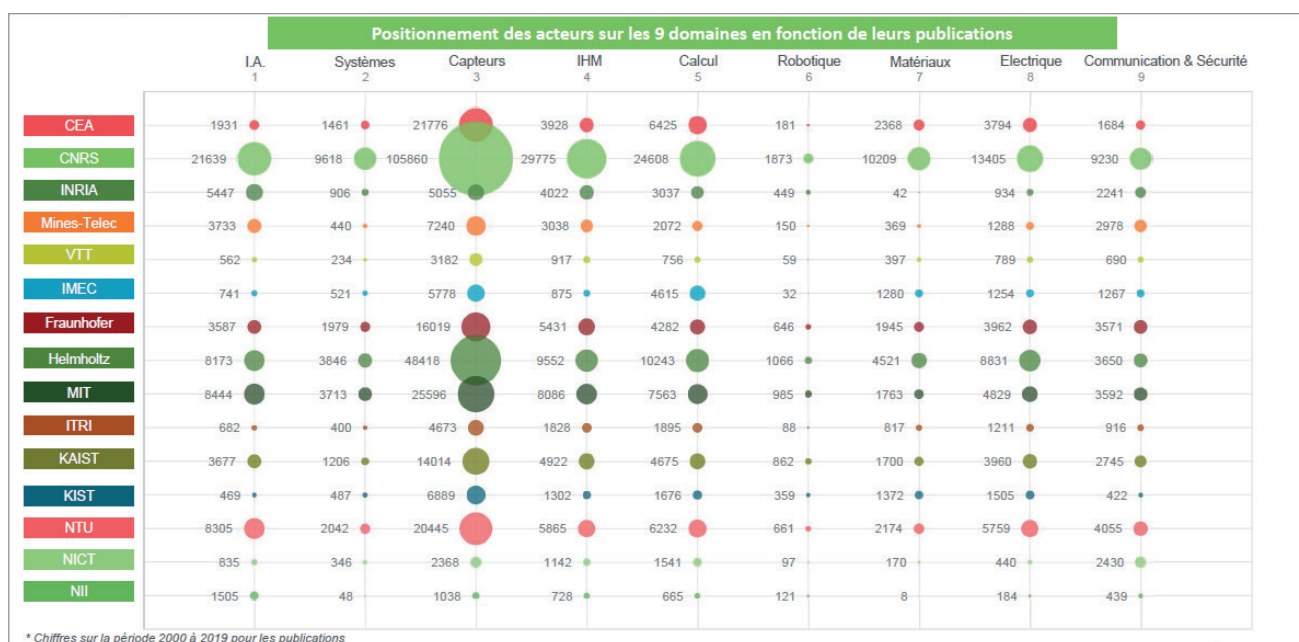


Rang CEA par domaine	Brevets	Publications
Intelligence artificielle	5 ^{ème}	9 ^{ème}
Systèmes	2 ^{ème}	6 ^{ème}
Capteurs	3 ^{ème}	4 ^{ème}
IHM	5 ^{ème}	8 ^{ème}
Calcul	3 ^{ème}	4 ^{ème}
Robotique	5 ^{ème}	8 ^{ème}
Matériaux	2 ^{ème}	4 ^{ème}
Electrique	2 ^{ème}	6 ^{ème}
Communication/Sécurité	4 ^{ème}	10 ^{ème}
Total	3 ^{ème}	5 ^{ème}

Les graphes de synthèse montrent que le CEA est très bien classé en matière de brevets où il se positionne à la troisième place des acteurs considérés grâce à plus de 6100 dépôts de brevets de 2000 à 2018, derrière le KAIST et le Fraunhofer ; il passe même en seconde position quand on se concentre sur les 3 dernières années.



Concernant les publications, le CEA est en 5^e position avec plus de 59 100 publications de 2000 à 2019 derrière le CNRS, les Helmholtz, le MIT et le NTU, particulièrement prolifiques. Le CEA tient un bon rang dans certains domaines (3^e sur les matériaux, 4^e sur le calcul, 6^e sur les systèmes).



Il ressort aussi de ces analyses que la plupart des acteurs de recherche dans le domaine du numérique mènent des activités dans les 9 domaines retenus, ce qui témoigne à la fois de synergie de compétences au sein d'un tel périmètre, mais probablement aussi d'un besoin de synergie de moyens, notamment en terme de plateformes ou de caractérisations ou encore de moyens de calcul/simulations.

Concernant enfin la couverture des modalités de recherche, peu d'acteurs de ce panel de leaders du domaine sont reconnus simultanément sur l'intégralité de l'échelle TRL, depuis la recherche la plus fondamentale dans ses différentes facettes, jusqu'au transfert de technologies vers le tissu économique. On peut dans une certaine mesure citer le MIT et l'association Helmholtz comme proches sur ce point du CEA. CNRS et Inria ont un spectre important de recherche fondamentale exploratoire, amont et utilisatrice éclairée du numérique mais sont moins investis sur la recherche technologique. KAIST et ITRI présentent un profil relativement proche du CEA mais sont nettement moins positionnés sur la recherche fondamentale.



2. VISION DU NUMÉRIQUE DU FUTUR

Résumé

L'évolution du monde numérique a toujours suivi celle des besoins de l'utilisateur, de la facilité d'utilisation, des services offerts. Tout a commencé avec le besoin d'exécuter des calculs toujours plus nombreux et complexes, puis de rapprocher la source d'information au plus près de l'utilisateur. En parallèle sont apparus Internet et le smartphone, lequel est aujourd'hui le moteur des avancées les plus importantes dans les technologies et les composants, y compris dans les nœuds très avancés. Le numérique connaît depuis plusieurs années un essor continu dans tous les domaines de la vie.

La transformation numérique se fait tout particulièrement sentir dans tous les secteurs industriels, en estompant les frontières métier. Les mutations industrielles et économiques sont larges et profondes, car le numérique transforme deux processus au cœur du fonctionnement des entreprises : la relation client et l'organisation de la production. Autres secteurs particulièrement dépendants du numérique : l'énergie et la santé. Dans le domaine de l'énergie, la numérisation constitue l'un des 3 enjeux clés, au même titre que la décarbonation et la décentralisation. Dans le domaine de la santé plus qu'ailleurs, le numérique est générateur de nouvelles solutions pour les patients et de marchés émergents.

La « continuité du monde numérique » est une tendance de fond qui va se prolonger. Amorcée avec l'avènement des technologies AR/VR/XR (réalité augmentée, réalité virtuelle et réalité étendue), elle se généralise, et les interfaces entre les usagers et le monde virtuel y jouent un rôle essentiel. Le numérique fait également évoluer l'organisation du travail tertiaire et se déploie dans l'usine du futur.

Ces évolutions sont supportées par des technologies sous-jacentes destinées à un déploiement massif telles que l'internet des objets, l'intelligence artificielle, la cyber sécurité, le jumeau numérique. Avec nombre de défis à relever : qualité, sûreté, sécurité des services, gestion et traitement des flux massifs de données, miniaturisation de composants toujours plus performants, le tout avec des contraintes fortes de réduction de la consommation énergétique.

a. Les ressorts de développement du numérique depuis 70 ans

L'évolution du monde numérique a toujours suivi celle des besoins de l'utilisateur, de la facilité d'utilisation, des services offerts. Les applications nomades et connectées ont porté les grandes révolutions technologiques à l'impact sociétal le plus visible (démocratisation avec le PC, smart phone...). Au-delà, le numérique connaît depuis plusieurs années un essor dans bien d'autres domaines en direction d'une nouvelle ère mondiale résolument « numérique ». On parle de numérisation de l'industrie, de la santé ou de l'énergie.

Tout a commencé par le besoin d'exécuter des calculs de plus en plus complexes et de produire plus de résultats à l'aide d'une machine : depuis les travaux de Turing, en passant par les premiers IBM, les mainframes, les serveurs et le HPC ont été les dominantes des années 80.

La tendance suivante dans les années 90 a été le rapprochement de la source d'information au plus près de l'utilisateur. Lancée par les premiers ordinateurs personnels, elle a prospéré et initié l'ère des produits de très grande diffusion (par centaines de millions), prolongée par les tablettes dans les années 2000.

En parallèle est apparu le besoin d'accéder à un champ de données plus vaste, alimentant l'utilisateur et élargissant considérablement la portée des moyens de calcul, qui a donné lieu à l'expansion d'internet avec des moteurs de recherche de plus en plus performants et de plus en plus adaptés à notre mode de vie et à nos attentes.

Le smartphone est né de la fusion des deux moteurs précédents, couplée à l'amélioration des réseaux cellulaires et aux offres attractives des opérateurs télécoms. Il a porté à son paroxysme l'effet « produit de masse ». C'est aujourd'hui le moteur des avancées les plus importantes dans les technologies et les composants, y compris dans les nœuds très avancés¹⁰. Le smartphone a aussi intégré des fonctionnalités complémentaires devenues aujourd'hui indispensables, comme l'appareil photo, le GPS ou le baladeur musical, par exemple.

Plus récemment, on a vu s'affirmer la tendance à la simplification des interfaces et à leur ubiquité. Les assistants personnels utilisent une interface vocale, plus accessible et plus naturelle que le clavier et sont déjà présents au domicile et dans la voiture, sous un format identique.

Le numérique s'est, en même temps, insinué dans de nombreux domaines de la vie quotidienne : développement de la mobilité assistée avec des véhicules connectés et autonomes, des drones autonomes et des villes « intelligentes » grâce aux technologies numériques. Ces tendances sont le fruit d'alignements stratégiques étroits entre plusieurs technologies (le constructeur automobile par exemple et les fournisseurs de technologies Lidar et IA — Valeo, Bosch, Mobileye... — dans le cas de la voiture autonome).

De cet historique de développement continu du numérique dans tous les domaines de la vie, nous essayons d'inférer ci-dessous quelques tendances pour le futur à 10-15 ans, avec toute la prudence qui convient dans une matière qui a réservé tant de surprises dans le passé.



¹⁰ : (iPhone 12 utilise un processeur réalisé en technologie 5 nm)

b. Un contexte industriel marqué par le fort pouvoir de transformation du numérique

Un pouvoir transformant sur tous les secteurs industriels

Le Service Bibliométrie Etudes Marketing du CEA a effectué une analyse des grandes tendances industrielles impulsées par le développement des technologies numériques.

Le premier point remarquable est l'émergence depuis une vingtaine d'années de champions globaux du numérique. En effet, le numérique estompe les frontières métier et nécessite de proposer des solutions globales, depuis le composant jusqu'au système et aux services. Les GAFAMs ou BATX se verticalisent et assoient ainsi leur domination en imposant des standards de fait dans une logique « *winner takes all* ».

Le second point remarquable concerne la nature par essence diffusante/générique de ces technologies : l'étude détaille ainsi l'impact global et majeur du numérique sur tous les secteurs industriels (énergie, santé, transports, défense, chimie et matériaux, bâtiment, agro-alimentaire, télécommunications...). Cette diffusion très large tient notamment au fait que la plupart des stratégies numériques déployées dans un secteur peuvent être appliquées à d'autres secteurs¹¹ et que le modèle économique privilégié est un modèle d'écosystèmes. Les mutations industrielles et économiques sont larges, mais également profondes, car le numérique transforme deux processus au cœur du fonctionnement des entreprises : la relation client et l'organisation de la production. La structuration de plateformes, l'émergence d'écosystèmes d'acteurs et la création de nouveaux services basés sur les données clients (XaaS : « *everything as a service* ») sont autant d'éléments qui redistribuent les cartes entre les acteurs d'une même chaîne de valeur. L'industrie 4.0 qui digitalise les lignes de production permet d'engendrer des gains de productivité significatifs qui se traduiront par une création de valeur cumulée estimée (avant la crise COVID) à 3 700 milliards de dollars à l'échelle mondiale d'ici à 2025.

Ainsi les technologies numériques possèdent un pouvoir transformant remarquable auquel aucun acteur ne peut se soustraire au risque de disparaître. Ce profond bouleversement interroge également sur la nécessité de conserver au plan national, ou européen, une maîtrise des technologies numériques soutenant une base industrielle et technologique souveraine.

L'énergie et la santé, deux secteurs particulièrement dépendants du numérique

Les préoccupations environnementales et sanitaires actuelles font de l'énergie et de la santé deux secteurs d'intérêt prioritaires.

Dans le domaine de l'énergie, la numérisation constitue l'un des 3 enjeux clés, au même titre que la décarbonation et la décentralisation. Les technologies numériques impactent l'intégralité du domaine, quels que soient les vecteurs énergétiques : par exemple elles pourraient diminuer de 60 % à 70 % les coûts d'exploitation aussi bien des centrales solaires que des champs d'éoliennes, et seront sans doute indispensables à l'équilibrage d'un réseau alimenté dans le futur par une part croissante d'énergies intermittentes et très autonomes.

Dans le domaine de la santé plus qu'ailleurs, le numérique est générateur de nouvelles solutions pour les patients et de marchés émergents, comme en témoigne notamment l'augmentation exponentielle des investissements dans les startups. A l'échelle individuelle, les technologies numériques joueront un rôle majeur dans la médecine 4P (préventive, prédictive, personnalisée et participative). Elles permettront de mesurer un nombre inédit de paramètres

¹¹ : En moyenne, 2 initiatives numériques industrielles sur 3 sont applicables à plusieurs secteurs.

comportementaux, cliniques, biologiques et génétiques. Ces paramètres pourront être appréhendés selon une approche intégrative afin de constituer un véritable jumeau numérique pour chaque patient et l'ensemble de ces données permettra, grâce aux techniques d'intelligence artificielle, de repenser et améliorer le suivi du patient. A l'échelle organisationnelle, le numérique permettra d'optimiser le parcours patient et de repenser les liens entre l'hôpital et la médecine de ville. Les gains attendus en termes d'efficacité des soins sont considérables.



c. Le numérique du futur

Imaginer le numérique de demain c'est donc anticiper l'évolution des besoins/usages/modalités d'utilisation et la possibilité de leur rencontre avec des technologies de rupture. C'est se projeter vers les nouveaux produits de masse pour de nouveaux usages, vers des solutions numériques pour accompagner les enjeux de santé et environnementaux, pour soutenir une industrie du futur, comme une science, plus intelligentes et performantes. Nous essayons de silhouetter ces perspectives, en sachant bien qu'il faut s'attendre à voir aussi émerger des fonctionnalités ou applications totalement inattendues. Nous traiterons d'abord des situations d'usage : nomade, résidentiel, tertiaire, usine, énergie, santé, avant d'aborder le socle technologique : IOT, matériaux, IA, cyber, calcul...

Cette réflexion est basée sur les tendances que nous observons, et la trajectoire la plus probable qu'elles dessinent. Certaines de ses évolutions seront bien entendu l'objet de controverses. Ce n'est pas l'objet de ce rapport de formuler un avis moral, social ou même philosophique sur le sujet, même si nous souhaitons évidemment que l'évolution du numérique soit contrôlée et raisonnée, dans un lien de confiance avec l'utilisateur, et préserve l'humain en apportant à tous un meilleur quotidien. Dans tous les cas, la suivre au plus près sera nécessaire pour que le CEA soit en situation de jouer un rôle utile de conseil aux tutelles et d'émettre des préconisations techniques et d'usage permettant de prévenir certaines dérives.

Continuité du monde numérique

Nous sommes tout d'abord convaincus que la « continuité du monde numérique » est une tendance de fond qui va se prolonger. Amorcée avec l'avènement des technologies AR/VR/XR (réalité augmentée, réalité virtuelle et réalité étendue), d'abord restreinte aux situations indoor, elle se généralise. Autrement dit, les services, les assistants numériques vont accompagner l'utilisateur de façon fluide et sans rupture dans son habitat, son espace de travail, ses moyens de transport, ses loisirs, son éducation. A cet effet, les capacités des réseaux Télécoms seront clés et ne pourront répondre à ces nouveaux usages que par l'augmentation de la bande passante, la réduction de la latence et de la consommation énergétique des réseaux cellulaires.

Rôle essentiel de l'interface entre l'utilisateur et le monde virtuel.

En situation nomade, on peut imaginer que les lunettes communicantes permettront de donner au monde virtuel une profondeur et ergonomie nouvelle, en superposant de façon contextualisée l'information numérique au paysage ambiant, avec des interfaces de commande plus simples et naturelles, un usage « mains libres », et venir ainsi concurrencer ou compléter le smartphone. Un certain nombre de défis techniques de miniaturisation, d'autonomie et de confort optique restent à relever, mais leur avènement est proche.

A résidence, s'y ajouteront les solutions à base d'écrans aux propriétés très nouvelles ou d'affichage sans support, qui offriront un confort, une souplesse et une « expérience utilisateur » d'une autre dimension. Alors que le nombre de smartphones dans le monde ne devrait plus augmenter aussi vite, voire atteindre un palier, un doublement du nombre et de la taille des écrans est prévu dans les dix ans. On peut imaginer alors des écrans multi sensoriels d'une taille permettant d'afficher une image proche à l'échelle 1, dotés d'une reconnaissance des états émotionnels par captation visuelle, audio ainsi que par les capteurs physiologiques. Ils permettront la génération automatique et l'affichage des informations adaptées en fonction des états émotionnels relevés et du contexte environnant, ainsi que le retour sensoriel haptique sur écran, puis dans l'air. Leurs propriétés nouvelles ouvrent la voie à une évolution du logement, qui devient aussi bureau, salle de sport, lieu d'évasion, s'adaptant ainsi aux situations de confinement que fait craindre la menace de pandémies récurrentes.

Transformation des modes et espaces de travail

En parallèle, la quasi uniformité de l'organisation du travail tertiaire devrait évoluer, tant elle est la source de difficultés importantes dans les villes : heures de pointe des transports, compétition foncière du logement et des bureaux, pics de consommation d'énergie. Un environnement numérique vraiment réaliste pour tenir une réunion efficace à distance permettra de limiter le besoin de déplacements, de réduire les inconvénients du télétravail et de le rendre plus efficace. Un effet positif sur l'expansion géographique des métropoles pourrait alors en découler, ainsi qu'une plus grande fluidité de la cohabitation à l'intérieur de celles-ci.

Le numérique se déploie aussi dans l'usine du futur pour répondre aux impératifs d'une production plus intelligente, efficace et flexible, plus rapide, avec un moindre impact environnemental. Accélérées par la pandémie du coronavirus, les grandes entreprises se sont lancées dans une nouvelle ère de transformation, misant sur l'innovation technologique et des transformations majoritairement numériques pour l'optimisation de la production, l'amélioration de la qualité et la traçabilité. Les robots et cobots apprenants, auto programmables, inscrits dans une chaîne numérique facilement reconfigurable, et intégrant une fabrication additive à haut débit en seront des briques essentielles. Le jumeau numérique permettra à l'homme d'interagir avec l'ensemble du système de production et de maîtriser le contrôle et l'impact sur l'environnement d'installations toujours plus complexes. La fabrication additive deviendra une source de flexibilité importante dans les outils de production.

Transition énergétique et numérique

De son côté, la transition énergétique se caractérise par une modification profonde des moyens et modes de production de l'énergie, passant d'un mode centralisé et stable dans le temps à une production plus décentralisée, diverse et intermittente. Cela induit des changements profonds dans le mode de gestion des systèmes énergétiques : le nombre de degrés de liberté à gérer impose le recours au numérique, avec au centre le jumeau numérique pour optimiser leur fonctionnement ainsi que celui du réseau en fonction de la surveillance de son état et de la prédiction que l'on en fait. De façon générale, le numérique aura un effet majeur sur l'excellence opérationnelle en transformant les différents niveaux de production (du jumeau numérique de l'usine de production des technologies, à la maintenance prédictive et prescriptive, ou encore à l'anticipation et l'ajustement par rapport aux marchés). L'électronique de puissance vit également une révolution : les nouveaux composants électroniques à composants grand gap, fonctionnant à des fréquences très élevées, associés à des systèmes de pilotage à base d'IA beaucoup plus fins, permettront d'améliorer fortement le rendement et la compacité des convertisseurs et de diviser par deux les pertes. Ainsi, le numérique sera essentiel à l'équilibre technique et économique de la transition énergétique.

Internet des objets

Nous ne détaillons pas ici l'évolution de l'ensemble des domaines : santé, défense, finance, agroalimentaire, services de toutes natures, etc. qui vont connaître un bouleversement par le numérique. L'internet des objets est la technologie sous-jacente à toutes ces applications de la maison, de l'usine, de la ville de la santé et des grands réseaux intelligents. On annonce 60 milliards d'objets connectés en 2030, et donc autant de solutions de calcul embarqué. C'est le plus grand marché du monde en nombre de pièces, qui fera l'objet des plus grands efforts d'optimisation coût/performance/consommation/sécurité.

Nouveaux matériaux

La découverte de nouveaux matériaux et procédés fait l'objet d'une compétition aiguë dans tous les domaines. Les grandes tendances incluent le recours à des nuances de procédés automatisables et reproductibles, l'optimisation des matières premières des procédés, des compositions chimiques, l'élargissement des gammes de matériaux disponibles. Le numérique dans ce domaine est un accélérateur de compréhension, en particulier pour des systèmes très complexes. L'apport du numérique se traduira en jumeaux numériques, matériaux ou procédés, pour simuler de l'échelle atomique jusqu'au volume élémentaire représentatif pour prédire les propriétés. La convergence HPC (*High Performance Computing*) et HPDA (*High Performance Data Analysis*) va accélérer cette tendance. Le domaine des matériaux va produire un nombre croissant de données (issues du calcul et des expériences de caractérisation), leur gestion et leur exploitation (en particulier par l'IA) est un enjeu clé pour proposer des solutions intégrées multi-échelle basées sur des connaissances à la fois expérimentales et numériques. La recherche de nouveaux matériaux par criblage « *ab initio* » va s'intensifier, avec un meilleur ciblage grâce aux méthodes d'intelligence artificielle.

Technologies transversales : IA, cyber, jumeau

La transformation profonde, par le numérique, de tous les secteurs que nous venons de décrire, sera nourrie par certaines technologies communes, destinées à un développement massif, comme l'intelligence artificielle, la cyber sécurité, le jumeau numérique, qui appellent un commentaire plus détaillé.

Le déploiement nécessaire et massif de l'Intelligence Artificielle (IA) dans les produits, qu'ils soient industriels ou produit de masse, impose des ruptures drastiques dans les pratiques et technologies de l'IA. Le déploiement opérationnel responsable de l'IA, en particulier dans l'industrie, fait face à deux défis majeurs :

- la capacité à assurer la qualité, sûreté, sécurité des services et ainsi renforcer la confiance des utilisateurs ; on parle alors d'IA de confiance ¹².
- la consommation : 90 % de la consommation dans un calcul classique est due aux mouvements des données, la tendance sera donc de plus en plus à exécuter les traitements d'IA au plus près des données afin d'assurer un niveau de consommation acceptable ; on parle d'IA embarquée. La performance des solutions d'IA embarquée sera drastiquement améliorée en portant les efforts sur la manipulation des données dans les processeurs, qui est restée très en retard, en termes de coût énergétique, sur les opérations de calcul logique unitaires. Les architectures nouvelles (calcul dans la mémoire « *in Memory-Computing* », nouveaux modèles de calcul bas niveau) apporteront des ruptures de plusieurs décades en la matière.

¹² : maîtrise des données et des algorithmes, robustesse, sûreté et sécurité ; évaluation de biais, stratégies d'apprentissage décentralisées et adaptatives, maîtrise de l'approximation des simulations à base d'IA pour accélérer la simulation de systèmes complexes

Dans tous les domaines précités, les objets numériques feront face au grand défi de la confidentialité des communications, et des systèmes. La tendance à l'hyper-connectivité accroît le besoin d'échanger des informations de manière efficace et sécurisée, mais aussi de traiter une masse d'information toujours plus importante. Sous le poids des données, les architectures des systèmes d'information se décentralisent et se capillarisent. L'enjeu global de sécurité, résilience et performance des systèmes distribués¹³ pourra être relevé par différentes voies : le développement d'une blockchain frugale et sécurisée basée sur une infrastructure de confiance partagée à impact énergétique faible, d'une bulle de connectivité autonome qui peut être reliée à un réseau de type 5G, et anticipant les futures évolutions vers la 6G (fourniture de ressources de communications sans-fil à haute-qualité de service — voire déterministe — pouvant être connectées à un réseau plus large échelle) et la conception des puces intégrées d'émission et de réception pour des communications quantiques DI-QKD et protocoles prouvés afin d'offrir des moyens de communications avec une garantie de sécurité sans précédent.

Plus généralement, la sécurisation des systèmes informatiques à très haute criticité (défense, énergie, santé, mobilité) constituera un enjeu de souveraineté face à une cybermenace criminelle en forte croissance. Sur ce front, il s'agit d'élaborer des techniques de défense permettant de résister à des attaquants disposants de moyens considérables - groupes étatiques ou réseaux mafieux, et aux nouvelles attaques en particulier (mais pas uniquement) issues de développements de l'informatique quantique. La cybersécurité aura un impact grandissant sur les autonomies politiques, économiques, et sociales françaises et européennes. Elle se traduit notamment dans la sécurisation des objets connectés industriels, et dans celle des outils, services et bases de données nécessaires aux institutions, aux entreprises et à la communauté citoyenne. Cette sécurisation va faire appel aux plus récentes technologies numériques (IA, calcul massif, IHM) pour automatiser et fiabiliser les actions de conception, de validation et de maintien en condition de sécurité des systèmes critiques et infrastructures sensibles.

La mise en œuvre du jumeau numérique (représentation numérisée d'entités du monde réel) se généralise dans de nombreux secteurs comme l'usine du futur, les grandes installations expérimentales, l'énergie et la santé avec la notion de patient digital, mais aussi pour le développement de nouveaux matériaux ou dispositifs et donne ainsi naissance à un monde en miroir. Les premiers jumeaux numériques ont fait leurs preuves pour leur capacité opérationnelle à superviser, modéliser et rationaliser les flux de données de différentes installations. Pour l'usine du futur, les réseaux énergétiques ou les grandes installations, le jumeau numérique doit permettre de pousser au maximum la représentation numérique des systèmes physiques. L'augmentation des capacités de calcul disponibles rend possible le développement de modélisation multiphysique et multiéchelle. Ce « double » permettra de reproduire en temps réel le fonctionnement d'une chaîne de production ou d'une installation grâce aux données envoyées par des centaines ou milliers de capteurs. Il accompagnera l'aide à la gestion de crise, le pilotage de la prise décision nécessitant des compétences de développement d'un jumeau prédictif. Et encore une fois, l'IA devra être intégrée pour interpréter les flux de données considérables qui seront produits (numériques ou expérimentales) et pour soutenir les modèles physiques.

¹³ : qui sont de plus en plus ouverts, hétérogènes, à topologie variable et dynamique – des facteurs qui peuvent augmenter leur vulnérabilité.

Socle hardware : capteurs et calcul. Enjeu de frugalité

Enfin, toutes ces technologies font appel à des composants de base pour capter l'information et la traiter par le calcul. Ces briques de base, toujours plus essentielles à la souveraineté économique, vont encore franchir un palier en performance, frugalité, miniaturisation, sécurité.

Les capteurs connaissent une évolution permanente de leurs performances et capacité d'intégration passant par la miniaturisation, pour aller vers des dispositifs intégrés de plus en plus complexes, le développement de multimodalités et l'amélioration de la sensibilité¹⁴. Le capteur se décline aussi bien dans les applications grand public qu'au cœur de l'instrumentation scientifique. De manière générale, le développement de capteurs à haute efficacité énergétique embarquant de l'intelligence artificielle est l'enjeu pour le futur. Un véritable changement de paradigme peut être proposé par la spécialisation de capteurs génériques par l'apprentissage in-operando. Par exemple, dans le domaine des capteurs pour l'automobile, il s'agit de passer d'un capteur ultraspécialisé à un capteur plus générique et universel dans une fonction — détection de position par exemple — qui par apprentissage développera de façon adaptative sa spécificité dans son application et environnement propre.

On estime que le numérique pourrait absorber en 2030 20 % de la production électrique mondiale. Cette perspective n'est pas soutenable, il sera donc indispensable de gagner 2 ou 3 décades dans les 10 ans à venir sur l'efficacité énergétique du calcul. Depuis 50 ans l'évolution est basée sur la loi de Moore avec des gains de 30 à 40 % tous les 2 ans, en ralentissement. Elle ne suffira pas à atteindre une efficacité de cet ordre de grandeur : des solutions en rupture forte seront activement recherchées pour maîtriser la consommation du numérique. Elles pourront s'appuyer sur de nouveaux concepts comme la spintronique ou la photonique, l'évolution des architectures par le rapprochement du calcul et des données ou la spécification des architectures pour augmenter les efficacités (calcul neuromimétique, biomimétique ou quantique...). Ces différentes voies ne seront pas adaptées à toutes les classes de calcul : on se dirige vers une ramification des solutions de calcul et vers des machines qui combineront plusieurs coprocesseurs ayant chacun un domaine d'application privilégié, ainsi que vers des solutions « au juste nécessaire » en particulier pour l'immense domaine des objets connectés, qui demande une optimisation ultime coût/performances/consommation.

La voie du « *more Moore* » se poursuivra pour sa part avec des nœuds de plus en plus miniaturisés utilisant des formes de transistors plus complexes, à plusieurs couches. La conception *Gate All Around* va s'imposer au nœud 2 nm. Ce domaine n'est plus accessible qu'à deux¹⁵ (ou trois si INTEL rattrape son retard) fondeurs seulement dans le monde et la sélection par les coûts de mise au point qui a conduit à cette situation est probablement irréversible. Cette situation soulève une forte préoccupation de souveraineté adressée résolument par les USA et plus récemment par l'Europe. Elle se traduit par un volontarisme d'installation de « fabs » avancées sur leurs territoires et une réflexion ouverte sur les moyens de restaurer une maîtrise technologique souveraine.

L'espace ouvert aux autres acteurs se situe dans les autres branches de la ramification et il ne cessera de s'élargir en termes de marchés comme on l'a vu.

¹⁴ : pour les capteurs ultimes, une sensibilité à la « particule » unique

¹⁵ : TSMC à Taiwan, Samsung en Corée

Pour terminer, deux éléments qui concernent plus particulièrement les activités scientifiques du CEA.

- Dans le domaine d'application scientifique, il faut souligner que l'évolution rapide des architectures matérielles des calculateurs et l'hétérogénéité des solutions matérielles : système embarqué, dispositif portable, supercalculateur, ... qui vient d'être décrite conduit à une accentuation du découplage entre le cycle de vie des applications qui capitalisent la connaissance scientifique, souvent sur plusieurs décennies, et celui des machines, ce qui va aussi transformer la conception et les méthodes de développement de ces applications.
- La donnée devient donc la base de beaucoup des développements et applications du numérique. La gestion et le traitement des flux massifs de données devient ainsi stratégique en particulier parce que les flux augmentent considérablement. Afin de valoriser au mieux la donnée, la chaîne entière, de sa production à sa valorisation, doit être maîtrisée et optimisée. Dans le domaine scientifique, la tendance est au partage des données, vers des HUB souverains pour accélérer les progrès scientifiques.



3. ETAT DES LIEUX DU NUMÉRIQUE AU CEA

Résumé

La cartographie des compétences du CEA met en évidence une masse critique de 2810 ETPT au CEA « civil » travaillant dans les 9 domaines du numérique préalablement identifiés par la mission : l'intelligence artificielle, l'ingénierie des systèmes, les capteurs, l'Interface Homme Machine, le calcul, la robotique/cobotique, les matériaux (jumeau numérique et fabrication additive), l'énergie et la cybersécurité. Ces compétences sont soutenues par 50 plateformes au niveau d'excellence académique et/ou à l'état de l'art industriel.

A périmètre équivalent, ces chiffres positionnent le CEA comme un acteur majeur du numérique en France, aux côtés de Inria qui compte 1600 scientifiques travaillant dans le numérique, et du CNRS qui en compte 2600.

Au niveau européen, les acteurs français se situent en bonne place, avec des effectifs et moyens comparables aux meilleurs laboratoires en Allemagne, Grande Bretagne et Benelux en particulier.

Les points forts du CEA sont liés à l'excellence qu'il a développée depuis des années dans les métiers de la recherche technologique et de la recherche fondamentale. Il sait mobiliser ses compétences pour adresser le développement de systèmes d'une très grande complexité nécessitant des innovations, voire des ruptures technologiques. Il est souvent présent sur l'ensemble de la chaîne de valeur, et sait adresser tout le cycle de vie d'un système. Enfin, il bénéficie d'une profonde culture et capacité à capitaliser la recherche sur des plateformes, méthodes, outils et instruments dédiés. Il affiche plus de 500 partenariats industriels actifs dans le numérique, et a régulièrement créé des startups dans ce domaine.

Afin d'optimiser le potentiel déjà considérable d'innovation du CEA au service de la science et de la société, la mission a relevé 3 points à travailler plus particulièrement : la mise en synergie maximales de ses compétences, la capitalisation des acquis et la capacité à gérer l'obsolescence des briques technologiques.

Dans une phase préliminaire la mission numérique a réalisé la cartographie des compétences de chaque direction opérationnelle. Des groupes d'experts ont analysé neuf domaines du numérique :

- **IA** : IA, algorithmie (analyse d'image, analyse sémantique...), IA embarquée, IA de confiance, HW dont mémoires dédiées;
- **Système** : Ingénierie des systèmes, méthodes formelles pour la conception et la validation, jumeau numérique, MBSE, quadriciels;
- **Capteurs** : Capteurs y compris imageurs, chaîne d'instrumentation et de traitement du signal, IOT, CPS;
- **IHM (Interface Homme Machine)** : IHM avancées, Réalité étendue XR, displays intelligents;
- **Calcul** : Architectures de calcul (quantique, HPC, puces et systèmes embarqués) et adaptation des codes, pile logicielle, mémoires;
- **Robot** : Robotique, cobotique;
- **Matériaux** : Conception numérique des matériaux, procédés et impression 3D;
- **Conversion, gestion et transport électrique** : électronique de puissance, BMS, EMS, réseaux intelligents;
- **Sécurité-Communications** : Cybersécurité, communication quantique, infrastructure numérique : télécom, réseaux, blockchain, interopérabilité des données.










Pour chacun de ces domaines un groupe de travail (GT compétences) a été constitué pour recenser les compétences et plateformes au CEA.



a. Recensement des compétences et des points forts du CEA

Compétences dans le numérique

La cartographie globale des compétences dans les 3 Directions opérationnelles « civiles » du CEA fait ressortir une masse critique de 2810 ETPT travaillant dans les 9 domaines du numérique. Les effectifs du numérique à la DAM ne sont pas communiqués.

	Total CEA	
Intelligence Artificielle Algorithmie et confiance, vision et langues, microélectronique et logiciels pour l'IO embarquée, IA pour les métiers	491	
Ingénierie des systèmes Ingénierie système et logiciel, méthodes et technologies formelles, jumeaux numériques	170	
Capteurs Capteurs chimiques, magnétisme et spin, rayonnements, imagerie biomédicale et bioimagerie, intégration 3D, imageurs, capteurs et actionneurs, capteurs pour l'instrumentation	484	
Interface Homme-Machine Haptique, audio, écrans, capteurs sensoriels, capteurs comportementaux, réalité virtuelle et réalité augmentée, visualisation	123	
Calcul Quantique, architectures et solutions matérielles, logiciel	642	
Robotique/ cobotique Matériel et logiciel spécifiques, simulation interactive, procédés (fabrication additive, contrôle non destructif), CPS	161	
Matériaux Conception numérique des matériaux, fabrication additive,	182	
Energie Numérisation des réseaux d'énergie, électronique et stockage d'énergie, ville intelligente	176	
Cyber sécurité Cybersécurité pour les infrastructures critiques, composants de confiance, communication, communication quantique	381	
Total CEA	2810	

Ces chiffres considèrent les ETPT tout effectif y compris les plateformes. Le périmètre de ces activités est décrit brièvement en annexe. Les détails sont disponibles dans les rapports fournis par les groupes de travail compétences en septembre 2020. Sont repris ici quelques éléments synthétiques permettant de décrire les activités spécifiques du CEA, ainsi que les thèmes en émergence pour tous les cas où d'autres organismes sont également présents.

Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle au CEA est développée selon deux axes structurants en réponse à la fois à des besoins internes, mais aussi à de forts enjeux sociétaux : intelligence artificielle responsable et maîtrise des données. Concernant le premier axe, le positionnement spécifique du CEA, du matériel au logiciel en passant par les composants, vise **à lever les 3 verrous que sont l'intelligence artificielle embarquée, l'intelligence artificielle frugale et l'intelligence artificielle de confiance**. La maîtrise des données quant à elle vise à mettre en place une infrastructure de capitalisation et d'exploitation souveraine des données pour les métiers.

Ingénierie des systèmes

De par son positionnement en tant qu'organisme de recherche sur le nucléaire, le CEA a de tout temps développé des méthodes spécifiques **pour l'ingénierie des systèmes complexes et critiques**. Ces compétences, portant principalement sur des méthodes mathématiques (méthodes formelles et modèles notamment) et des outils logiciels, permettent au CEA de se positionner sur des jumeaux numériques de systèmes (approches multi-physiques, multi-échelles spatiales ou temporelles, jumeau adaptatif...), des outils d'ingénierie de systèmes allant vers la cognification et de l'ingénierie de la connaissance pour une meilleure continuité d'actions sur tout le cycle de vie d'un système.

Capteurs

Le CEA, comme beaucoup d'organismes de recherche, met en œuvre une très grande diversité de capteurs originaux, souvent de hautes performances (capteurs inertiels, imageurs, capteurs de rayonnements, capteurs chimiques...) et adaptés à différents environnements, notamment les plus sévères, pour ses besoins propres en instrumentation ou pour les besoins de ses partenaires. Les compétences du CEA couvrent toute la chaîne de capteurs : transduction, signal analogique, traitement proche capteur et protocoles de communication, avec des efforts en nette croissance sur le traitement des données proche capteurs. Tous les domaines d'application sont adressés : la santé et le bien-être, l'industrie du futur, l'économie circulaire, les applications grand public...

Interface Homme Machine

Le CEA est présent sur deux grands axes de cette thématique : l'instrumentation scientifique, au cœur des missions du CEA et au service de l'excellence de sa recherche, et la perception multi-sensorielle, à l'interface des mondes réel et virtuel. **L'instrumentation scientifique repose sur le développement de capteurs innovants hautes performances vers une sensibilité ultime**, de l'imagerie spatiale aux technologies quantiques de l'information, en passant par les neurosciences, le monitoring des gaz à effet de serre et la détection des rayonnements. Le CEA travaille également dans le périmètre des interfaces sensorielles, des capteurs comportementaux et de la réalité étendue, avec des compétences sur toute la chaîne depuis le composant jusqu'au système. Les compétences du CEA sont particulièrement reconnues **dans le domaine des écrans et dans celui des IHM multi sensorielles intégrant la vision, l'audio et l'haptique**.

Calcul

La thématique couvre tous les aspects nécessaires pour concevoir, réaliser, développer et utiliser les systèmes de calcul, aussi bien dans leur aspect matériel que logiciel. Dans ce domaine, le CEA mène ses recherches **vers la miniaturisation et l'optimisation de la consommation énergétique** des technologies et architectures de calcul pour une augmentation continue des performances. Côté matériel, les spécificités du CEA sont la maîtrise de technologies clés telles que le FDSOI, les transistors à nanofils, la spintronique, les mémoires non volatiles, les technologies d'intégration 3D monolithiques et hétérogènes, ainsi que la photonique sur Si.

Dans le domaine de la conception des architectures de calcul, le CEA représente une masse critique d'ingénieurs-chercheurs remarquable sur le plan national. Au-delà du nombre, les compétences spécifiques du CEA dans ce domaine concernent d'une part le développement d'outils pour la maîtrise de l'hétérogénéité du calcul et d'autre part la sûreté de fonctionnement de ces architectures, notamment pour les dispositifs de calcul cyber-physiques. Le CEA est également fortement positionné sur le calcul de demain, et notamment le quantique du point de vue matériel (qubits sur Si et supraconducteurs) et du point de vue logiciel. Dans le domaine du calcul, **le CEA a un positionnement spécifique**, en tant **qu'acteur régalien** mettant en œuvre des moyens de calcul haute performance et en tant **qu'organisme de recherche** internationalement reconnu sur des technologies et architectures pour le calcul.

Robotique/cobotique

La robotique est une activité historique du CEA qui a développé la télé-opération pour les besoins de l'industrie nucléaire. L'activité s'est diversifiée dans le domaine de l'industrie 5.0 au travers de la cobotique et de la robotique collaborative et aujourd'hui relève le défi de l'intelligence artificielle pour accroître le degré d'autonomie des robots. Ces technologies, parce qu'elles permettent une plus grande flexibilité, une amélioration de la qualité et de la traçabilité, conditionnent aujourd'hui la relocalisation des lignes de production et la souveraineté associée. Le CEA maîtrise un panel cohérent de technologies (robotique contrôlée en efforts, perception, modélisation de la connaissance ou ingénierie des logiciels...) et a développé des plateformes qui permettent l'intégration de briques et le développement de nouveaux usages (robotique interactive intelligente, usine numérique et intelligente, ingénierie logicielle et systèmes...). **Les recherches sont menées sur deux axes forts : la programmation intuitive des robots et la manipulation intelligente.**

Matériaux

Les équipes du CEA travaillent selon deux axes de recherche qui modifient la manière de concevoir et d'utiliser les matériaux :

- **Le concept de jumeau numérique** appliqué aux matériaux pour reproduire virtuellement les fonctionnalités de ceux-ci en s'appuyant sur des caractérisations digitalisées, croisées à des simulations multi-échelles;
- La digitalisation des procédés de mise en œuvre des matériaux et notamment **la fabrication additive** grâce aux méthodes de contrôle non destructif en vue de l'amélioration de ses performances en rendement et l'élargissement du type de matériaux utilisés. A terme l'emploi des algorithmes d'intelligence artificielle pour optimiser les jumeaux numériques de matériaux et procédés.

Numérique pour l'énergie

La vision développée par le CEA, acteur historique et régalien de l'énergie, s'articule autour de 3 enjeux : **les composants énergétiques augmentés par le numérique** (« faire plus et plus longtemps »), **les réseaux augmentés par le numérique** (« faire autant autrement ») et un **numérique sobre au service de l'efficacité énergétique** (« faire plus avec moins de matière et d'énergie »).

Cybersécurité

La cybersécurité est un axe fort du CEA, organisme régalien, à la fois en tant qu'opérateur d'installations critiques et en tant qu'organisme de recherche développant des technologies (FDSOI, packaging...), des composants, des protocoles de communication et des outils logiciels, intégrant les nouvelles technologies numériques comme l'intelligence artificielle

(cybercentaure), pour la cybersécurité. Ce socle de compétences est appliqué à lever les principaux verrous que sont la **cybersécurité des objets connectés**, ainsi que celle des **infrastructures critiques et intelligentes**. Du côté des **protocoles de communication**, le CEA conçoit des systèmes sécurisés dès la conception, qu'ils s'agissent de réseaux filaires ou de transmissions sans fil. La blockchain, protocole sécurisé adapté à des systèmes distribués très étendus, mobilise une équipe importante. Enfin, les communications quantiques, réputées inviolables, sont un axe fort de recherche.

Points forts génériques du CEA dans le numérique

Les points forts du CEA sont liés à l'**excellence** qu'il a développée depuis des années dans les métiers de la recherche technologique et de la recherche fondamentale :

- pour la recherche fondamentale dans les domaines de la physique nucléaire, des sciences du vivant et de la santé, du climat, de l'astrophysique, des matériaux et de la cybersécurité ;
- pour la recherche technologique : dans les systèmes numériques, la cybersécurité et en microélectronique, le CEA est reconnu comme un des 3 pôles majeurs en Europe avec l'IMEC et le FhG.

Le CEA sait mobiliser ses compétences pour adresser le **développement de systèmes** d'une très grande complexité nécessitant des innovations, voire des ruptures technologiques (ex. FACE avec Renault (DRT), ITER, ISEULT (DRF), ASTRID (DES, DRT, 14 partenaires internationaux), NUWARD (CEA, TA, NG, et EDF), LMJ (DAM), etc.).

Le CEA est souvent présent sur l'ensemble de la **chaîne de valeur**. Par exemple pour les capteurs, il couvre cette chaîne depuis les briques technologiques de base jusqu'à l'intégration de fonctions dans des systèmes et le traitement de données. Autre exemple, les IHMs avancées : du capteur jusqu'à l'analyse du comportement de l'utilisateur et des usages, avec une collaboration étroite entre différentes disciplines (capteurs, MEMS, mécatronique, électronique embarquée, informatique, traitement du signal, ergonomie, psychologie et facteurs humains) ainsi qu'une connaissance des domaines d'applications très variés.

Le CEA sait adresser tout le **cycle de vie** d'un composant ou d'un système, une compétence qui deviendra de plus en plus cruciale avec la raréfaction des ressources.

Intrinsèquement le CEA bénéficie d'une profonde culture et capacité à **capitaliser la recherche**. Sachant que l'émergence d'une technologie numérique peut parfois prendre une dizaine d'années, cette capacité de continuité et de résilience dans l'effort est un atout important.

Avec plus de 500 partenariats industriels actifs dans le numérique, le CEA possède une bonne expérience du **transfert industriel**.

Le CEA a régulièrement créé **des startups** dans le domaine du numérique, dont les plus connues et les plus anciennes sont STMicroelectronics et Soitec, classées dans les 50 plus fortes valorisations françaises. A titre d'exemple : ALEDIA, APIX, ARYBALLE, DIOTA, eLICHENS, ETHERA, HAPTION, HRV, ISKN, ISORG, ISYBOT, MICROOLED, MOVEA, RB3D, L&S, SPORT QUANTUM, Cyclelife DS, Worms, Crocus, Antaios, Evaderis.



b. Recensement des plateformes

Les compétences sont soutenues par 50 plateformes au niveau d'excellence académique et/ou à l'état de l'art industriel. Les plus importantes sont citées ci-dessous :

- Les plateformes à l'état de l'art industriel avec partenariats et impact national : Ces plateformes permettent de s'aligner sur les roadmaps stratégiques de partenaires du CEA. Par exemple dans le domaine du semi-conducteur les plateformes au standard industriel (Nanoélectronique 200 nm et 300 nm, Photonique, Microsystème 200-300 nm...) permettent de développer des démonstrateurs rapidement transférables dans un environnement industriel. Ces plateformes peuvent être complétées par des traitements effectués par des tiers industriels ou académiques lorsque le CEA ne dispose pas de l'équipement nécessaire¹⁶. Tous les domaines de compétences bénéficient de plateformes à l'état de l'art industriel.
- Les plateformes de recherche fondamentale avec impact scientifique international : Ces plateformes permettent de mener des recherches amont et en rupture. Par exemple la Plateforme Technologique Amont (PTA) de la DRF permet de tester le fonctionnement de nouveaux dispositifs quantiques.
- Les plateformes opérationnelles destinées aux besoins internes du CEA : par exemple pour la qualification de robots d'intervention ou le calcul intensif.

L'ensemble des plateformes par axe de compétence figurent en annexe de ce rapport.

Compétence/ Plateforme	Calcul	Capteurs	IA	Systèmes	IHM	Robot	Matériaux	Energie	Comm. & Cybersécurité
Plateforme à l'état de l'art industriel avec partenariats et impact National	Photonique			Intelligence Ambiante		CND	Poudr' Innov	Smart Grid:	Cybersécurité
			Ingénierie logicielles systèmes			Robotique			
	Conception de CI:	Plateforme microsystems 200 et 300 mm	conception de Syst. embarqués:		Simulation interactive et réalité étendue				Objets commu- nicants
	Nanoélec. 300mm PFNC , PF Techno Amont (PTA) PF de nanofabrication SPEC (ADN) PF de métrologie capteurs magnétiques						PFNC Lignes CRG ESRF & ILL (experience operando),		
Plateforme de recherche fondamentale avec impact scientifiques International	Centre de simulation prédictive		France Génomique (Nle)	Simcryogenics			Centre de simulation prédictive, 40 ETPT		traitement et analyse des données
	GATE CAD								
Plateforme opérationnelle avec impact majeur sur les activités du CEA	CATI N4HCloud			PRESAGE SALOME	Plateforme de qualification robotique pour les projets A&D	SAMANTA		Plateforme du STIC à CAD	URANIE :
	CCRT TRUST		URANIE :						



¹⁶ : c'est par exemple le principe du « flying wafer » qui permet de mutualiser les infrastructures au niveau national et international, grâce à la conformité à certains standards d'exploitation.

c. Conclusion : le CEA est un acteur majeur, mais méconnu, du numérique en France au côté d'INRIA et du CNRS

L'analyse des compétence et plateformes a été complétée par une analyse bibliométrique pour comparer le CEA aux principaux autres acteurs de la recherche nationale et internationale. (cf 1.C)

Les effectifs dédiés au numérique au CEA dépassent les 3 000 salariés scientifiques. L'envergure de l'activité numérique au CEA a été longtemps méconnue en France, sans doute en raison de l'identification forte du CEA à sa vocation nucléaire (civile ou militaire) initiale. C'est bien sûr au soutien de sa mission nucléaire que le CEA s'est d'abord doté de compétences numériques. Sans affaiblir ce besoin et cette motivation de départ, le numérique s'est par la suite considérablement développé, au point de devenir un axe d'excellence à part entière de l'organisme, comme en atteste le benchmark du chapitre 1c.

A titre de comparaison :

- Inria compte environ 2 400 salariés propres dont 1 600 scientifiques, tous travaillent dans le domaine des technologies pour le numérique ;
- Le CNRS compte environ 2 600¹⁷ salariés dans le domaine numérique ;
- L'IMT compte environ 1 100 chercheurs (au total), sur 5 « transformations » dont 3 principalement numériques organisés en 29 laboratoires ;
- Au niveau européen, les acteurs français se situent en bonne place, avec des effectifs et moyens comparables aux meilleurs laboratoires en Allemagne, Grande Bretagne et Benelux en particulier.

Par rapport aux deux autres principaux acteurs du numérique en France, INRIA et CNRS, le CEA est aujourd'hui très complémentaire :

- Une analyse comparative des travaux menés par l'INRIA et le CEA dans le numérique montre une bonne complémentarité entre les 2 organismes. INRIA est moins impliqué dans des développements matériels nécessitant des grosses plateformes, mais plus actif que le CEA sur les fondements mathématiques, algorithmes et logiciel. Le CEA évolue souvent dans une zone de TRL plus proche du développement industriel et de la montée en maturité des technologies du numérique. INRIA est comparable au CEA dans sa volonté de contribuer activement à la création de startups. La complémentarité entre le CEA et l'INRIA est bénéfique et source d'accélération pour les deux parties. Les plans d'accélération nationaux sur le quantique, la cybersécurité et l'Intelligence Artificielle vont favoriser naturellement des travaux en commun.
- Avec le CNRS, le CEA a une longue tradition de collaboration dans de multiples domaines ; ces collaborations ont donné naissance à des structures communes comme les UMR (Unité Mixte de Recherche). Les équipes du CNRS / LTM à Grenoble sont, par exemple, totalement intégrées avec les équipes du CEA-Leti et partagent les mêmes locaux et plateformes. Le succès de SPINTEC sur la spintronique est également un excellent reflet de la pertinence de rapprocher sur certains sujets les équipes CNRS et CEA.

¹⁷ : Ces données ne prennent pas en compte l'effectif des personnels des Universités, Ecoles et Organismes affectés dans les unités mixtes de recherche avec le CNRS.

- Sous la forme de collaborations fortes de site : à Saclay ou à Grenoble par exemple, des projets concrets entre l'INRIA et le CNRS sont mises en place. On peut signaler une collaboration et un partage des locaux avec l'INRIA sur les systèmes embarqués et le logiciel et le projet commun (Quantum Spin Grenoble) monté conjointement avec les équipes du CEA (DRT et DRF) et le CNRS Louis Néel pour le projet Qubit de spin sur silicium.

A titre d'illustration, la mission de programmation scientifique du PEPR quantique, menée conjointement par les trois organismes a fait apparaître une cartographie des forces de recherche qui pave le domaine avec des recouvrements très limités et une très bonne complémentarité.

Sans oublier le rôle de quelques universités, il est probablement exact de représenter la recherche numérique en France comme bien couverte par les trois organismes CEA, INRIA et CNRS, dont un certain nombre d'unités mixtes, chacun avec ses champs spécifiques néanmoins.



d. Pour autant, le potentiel du CEA dans le numérique est-il pleinement exploité ?

Le numérique au CEA, on l'a vu, représente aujourd'hui un potentiel considérable d'innovation au service de la science et de la société, dans un contexte où la transition numérique est un enjeu national de première importance. Dans cette section, nous nous interrogeons sur les leviers d'optimisation de ce potentiel au regard du niveau d'ambition que se fixe le CEA et des exigences des défis numériques.

Dans cette optique, la mission a relevé plusieurs points à travailler plus particulièrement :

La mise en synergie des compétences du CEA

Les technologies à développer nécessitent, bien plus que par le passé, une approche systémique, ainsi que la mobilisation de masses critiques de compétences souvent rares. Or le fonctionnement traditionnel de la recherche, qui reste marqué par les silos disciplinaires, aboutit en général à un partage d'expérience reposant souvent sur le hasard des rencontres, à des acquis peu réutilisés et en conséquence à des efforts de développement dupliqués. L'organisation en mode projet transversal est plutôt réservée à des opérations de très grande ampleur, peu présente en revanche au quotidien.

La capitalisation des acquis

Les méthodes de la recherche appliquée, comme par exemple les livres de procédés, n'ont pas toujours leur équivalent dans le champ du numérique. Par nature, un projet numérique peut être conçu dès l'origine avec un souci de généricité plus ou moins poussé. Les contraintes de coût/délai au niveau du projet unitaire sont souvent des freins à la capitalisation, alors qu'une approche en coût global montre un intérêt économique inverse. Nombre des axes que nous proposons ont un caractère d'outil assez générique, c'est pourquoi ce sujet de capitalisation devient de plus en plus important et appelle des moyens et méthodes propres, installés dans la durée.

La capacité à gérer l'obsolescence des briques technologiques

Le numérique induit des vitesses d'obsolescence rapides. Là où l'on raisonne en dizaines d'années dans l'énergie ou l'aéronautique, on parle de quelques années dans le numérique. Les équipements de fabrication des semi-conducteurs ont une durée de pertinence d'environ 5 ans. Les couches logicielles pour HPC dans des codes de simulation doivent être renouvelées au rythme des supercalculateurs. Les moyens de cryptographie sont sans cesse challengés par les hackers. Pourtant le CEA construit sa crédibilité dans la durée sur des briques d'excellence : il doit s'organiser en particulier pour maintenir la pertinence de celles-ci, autant pour ses besoins propres que pour son attractivité externe.

Dans la section 6 notamment nous esquissons des solutions permettant de traiter ces points.



4. COHÉRENCE D'ENSEMBLE AU CEA

Résumé

Les innovations et révolutions technologiques passent par une recherche fondamentale exploratoire autonome et une recherche amont forte. La diversité des activités de recherche du CEA se révèle un atout différenciant à la lumière des besoins du numérique. Dans ce domaine, l'avenir du CEA passera par une continuité structurée des travaux de ses composantes, des plus fondamentales aux plus appliquées.

Le CEA est présent sur toute la chaîne de la valeur (du composant au système) dans plusieurs segments majeurs du numérique : calcul, communication, perception et instrumentation, IA et cybersécurité. Qu'il ait à réaliser un sous-système complet, ou qu'il collabore avec un partenaire qui en a la charge, la compréhension d'ensemble dont il est capable est toujours un avantage pour ses partenaires et il est évidemment nécessaire de cultiver cette largeur de spectre dans l'avenir.

Simulation, IA, calcul et analyse de données haute performance (HPC et HPDA), modélisation, cybersécurité..., la maîtrise de la donnée, de sa mesure ou sa simulation à son traitement, sa transmission et son utilisation, est indispensable à la recherche scientifique et technologique. Aussi, les technologies du numérique jouent-elles un rôle essentiel dans les grands défis scientifiques actuels, et sont au service des différentes missions du CEA. Aujourd'hui, les apports du numérique constituent l'un des arguments fondateurs en faveur d'une communauté numérique interne forte, en tant que ressource indispensable à l'ambition scientifique du CEA dans les trois transitions.

Les outils numériques sont en effet au service de ses missions dans la transition énergétique, la transition numérique, pour le développement de technologies pour la médecine du futur (exploration du vivant, organisation des soins...) et pour la défense. Enfin le HPC/HPDA constitue une thématique transverse au sein du CEA et occupe une place croissante dans toutes ses activités, que ce soit sur le plan fondamental comme sur les plans technologique et applicatif.

a. A l'origine des innovations, la recherche fondamentale exploratoire et la recherche amont

Une recherche fondamentale autonome liée par les concepts aux enjeux du numérique

L'histoire des innovations et révolutions technologiques montre la contribution irremplaçable de la recherche autonome, se justifiant seulement par le progrès des connaissances qu'elle engendre. C'est cette recherche qui permet souvent les ruptures les plus spectaculaires. On peut citer ici l'exemple des recherches fondamentales sur les systèmes quantiques à deux états et l'intrication de qubits. Quand, à la fin des années 80, la première équipe CEA se lança dans ce domaine, ces travaux n'étaient l'amont de rien, une pure recherche de connaissance. 40 ans plus tard, l'ordinateur quantique porte l'espoir d'une révolution numérique majeure et les équipes les plus avancées comme celle de Google reprennent des concepts inventés au CEA.

Pour être séminale, cette recherche fondamentale autonome doit être large car le front de la connaissance, les avancées scientifiques et technologiques, et les grandes découvertes prennent souvent des chemins détournés. A minima, elle doit couvrir le champ des connaissances liés par les concepts aux enjeux applicatifs ou sociétaux. Ainsi pour les dispositifs du numérique le CEA pourra bénéficier des travaux de ses équipes en physique de l'information à la fois en termes de degrés de liberté support physique de l'information, de lois de transformation et de phénomènes remarquables associés ainsi que de matériaux et dispositifs permettant de les mettre en évidence, de les étudier et de les maîtriser. Cette frontière de la connaissance est aujourd'hui la frontière quantique avec des degrés de liberté allant du spin jusqu'au photon en passant par les excitations dans des systèmes de différentes dimensionalités et des matériaux aux propriétés quantiques remarquables et des questions allant des phénomènes collectifs à l'intrication de degrés de liberté individuels.

Tout comme les autres organismes et les universités, le CEA ne dispose pas, au niveau de la recherche fondamentale, d'une couverture interne exhaustive des champs d'intérêt du numérique. Le numérique s'appuie en amont sur deux piliers que sont la physique de l'information et les mathématiques appliquées. La démarche mathématique imprègne le développement de l'informatique fondamentale où nombre de théories et résultats mathématiques sont utilisés. Si le premier pilier est très bien couvert par le CEA, le second pilier est beaucoup moins présent au CEA. Par exemple les domaines de l'arithmétique, de la théorie des graphes, des théories de l'information de la complexité ou de la calculabilité sont fondamentaux dans les systèmes de communication et de traitement de l'information (science informatique). Pour cette raison, le CEA a de nombreuses collaborations académiques, évoquées ailleurs dans le rapport. Au-delà de ces collaborations de projet, les axes proposés comportent des veines de recherche qui justifient des partenariats structurés de longue haleine, avec notamment le CNRS et Inria. Cette tendance de fond est abordée au chapitre 7.

Une recherche amont intégrée aux feuilles de route numériques

Les travaux de la mission numérique ont également fait ressortir l'importance de la recherche amont (au sens où elle est conduite en ayant déjà entrevu une finalité applicative) pour assurer la pertinence des axes proposés. Elle s'illustre par des exemples :

- **Communication quantique** : des travaux amont sont indispensables pour aboutir à une *blockchain* quantique à moyen/long terme.

- **Calcul quantique** : différents dispositifs (choix des grilles, des dispositifs de lecture et de manipulation, etc) et différents matériaux sont conçus par les équipes de nanosciences, puis réalisés en salle blanche par les équipes de technologie, puis testés (intrication) avec des moyens de recherche fondamentale dans une collaboration permanente.
- **Usine du futur** : elle nécessite une recherche amont soutenue sur le jumeau numérique et sur l'autonomisation des robots par IA
- **Matériaux** : la modélisation fine aux différentes échelles microstructurales fait appel à des expertises fondamentales au niveau atomique, comme au niveau d'agrégats mésoscopiques en modélisation physique, comme en caractérisation. Cette approche est un pilier des travaux d'augmentation des performances des batteries et d'optimisation de leur pilotage, par exemple. De même, pour les cellules PV, la compréhension des mécanismes de recombinaison des porteurs est essentielle à l'augmentation du rendement. De manière plus générale, on cherche à sélectionner des matériaux et leur traitement (dopage par exemple) pour assurer une propriété donnée (la conductivité, la stabilité...) en substituant progressivement la simulation au criblage.

Il s'avère que la capacité à associer une expertise amont puissante à une feuille de route de maturation technologique est un avantage compétitif de plus en plus précieux au plan international. Le CEA a la chance de pouvoir effectuer ce couplage en interne, de manière plus simple et plus efficace. La mission recommande fortement de cultiver cette pratique, à travers un partage des feuilles de route décrit au chapitre 6.

Recherche fondamentale, amont, technologique : un continuum riche et de plus en plus cohérent

La diversité des activités de recherche du CEA, héritée de son histoire, se révèle un atout différenciant à la lumière des besoins du numérique. Dans ce domaine, l'avenir du CEA passera par une continuité structurée des travaux de ses composantes, des plus fondamentales aux plus appliquées. Du point de vue des industriels, cette capacité à générer des idées en rupture, comme à pousser la maturation, dans ses plateformes, jusqu'à l'orée du développement industriel, en raccourcissant le temps de passage en production, en fait un partenaire privilégié, pour des travaux parfois complètement intégrés dans des démarches de mise au point très proches du marché.



b. Couverture de la chaîne de valeur

Le CEA est présent sur toute la chaîne de la valeur (du composant au système) dans plusieurs segments majeurs du numérique :

- **Calcul** : Technologies et composants quantiques 2.0 pour l'ordinateur et les simulateurs quantiques, nouveau matériaux et support de l'information comme la spintronique ;
- **Communication** : photonique ultime et communication quantique ;
- **Perception et instrumentation** : capteurs quantique 1.0 et 2.0 ;
- **IA** : compréhension du cerveau ;
- **Cybersécurité** : cryptographie quantique et post-quantique.

Parmi les éléments de la chaîne, mentionnons :

- **Génie logiciel** : Élément clef permettant les développements informatiques de manière optimisée et fiable, incluant la modélisation, la simulation et le traitement des données utilisant des moyens de calcul tels que le HPC ou le HPDA ;
- **Data for Science** : traitement massif et intelligent des données scientifiques que ce soit pour la physique ou pour la santé ;
- **Numérique et Matériaux** : calcul ab-initio, calcul microscopique ;
- Plateformes au standard industriel pour les composants de l'industrie du futur et des composants semi-conducteurs, la vérification formelle de code ;
- Agrégation des différentes briques dans des systèmes complexes, co-conception, en particulier alliant le *hardware* et le *software*.

Cette compétence globale n'a pas pour finalité en général de réaliser un travail d'intégrateur, qui est l'apanage de certains industriels systémiers. Sa plus-value est ailleurs. Elle réside dans la nécessité croissante d'optimiser concomitamment les différentes couches d'un système en co-conception, depuis le composant de base, son intégration dans un circuit ou un capteur, jusqu'au logiciel de commande proche hardware, voire jusqu'aux algorithmes de pilotage, aux normes d'exploitation et au cycle de vie, en intégrant les contraintes de disponibilité/coût des matériaux de base, la *Balance of System*, la consommation énergétique, etc pour atteindre des performances globales plus élevées. Qu'il ait à réaliser un sous-système complet, ou qu'il collabore avec un partenaire qui en a la charge, la compréhension d'ensemble dont est capable le CEA est toujours un avantage pour ses partenaires et la mission recommande évidemment de cultiver cette largeur de spectre dans l'avenir.



c. Le numérique au service des missions du CEA

Le numérique omniprésent dans la recherche moderne

Les technologies du numérique au CEA sont nées des besoins du nucléaire. Elles se sont progressivement imposées au cœur de nombreuses missions du CEA car la maîtrise de la donnée, de sa mesure ou sa simulation à son traitement, sa transmission et son utilisation, est indispensable à la recherche scientifique et technologique d'aujourd'hui. Les besoins des sciences et technologies développées au CEA vont souvent au-delà de l'état de l'art car la performance numérique est un élément différenciant en recherche. Ainsi le CEA a souvent été pionnier dans l'utilisation des technologies de l'information et de la communication. La simulation et le HPC en sont des exemples emblématiques. La capacité de créer et développer une instrumentation d'exception pour ses domaines de recherche et ses applications caractérise aussi le CEA. Ces capacités numériques s'étendent à l'ensemble des outils de la recherche depuis la simulation pour la conception de dispositifs au pilotage et à la maintenance des installations. Cela concerne ainsi l'ensemble de ses missions, de la recherche fondamentale à la défense et la sécurité en passant par l'énergie, la santé et le numérique lui-même qui a besoin d'outils numériques performants pour être développé au meilleur niveau de la compétition internationale.

Le CEA premier utilisateur (et référence) de ses propres technologies numériques

Les capacités numériques du CEA sont ainsi un atout pour l'ensemble de sa recherche qui en retour offre un terrain d'essai exceptionnel à une partie de ses technologies émergentes (IA, calcul quantique, capteurs ultimes...). Le vivier d'utilisateurs pionniers (*early adopters*) formé par les laboratoires du CEA permettra à la technologie d'être « déverminée », maturée et optimisée avec un niveau d'exigence élevé et en quelque sorte « dérisquée » au profit d'utilisateurs extérieurs dont la tolérance au risque est de manière générale plus faible que pour un organisme de recherche. Cette approche a également l'avantage de sortir du simple schéma « client-fournisseur » en entrant dans une logique de co-développement et d'innovation accélérée par l'usage. Quelques exemples :

- Les composants électroniques haute performance pour les applications défense;
- La robotique d'intervention pour l'activité d'exploitant nucléaire;
- L'instrumentation spatiale fruit de la collaboration de DRF et DRT avec la mission Herschell ou les projets structurant du Labex FOCUS entre Saclay et Grenoble;
- Les capteurs avancés pour l'instrumentation scientifique.

La section qui suit détaille maintenant les apports du numérique pour chacun des champs de recherche principaux du CEA. Ils constituent l'un des arguments fondateurs de notre recommandation générale en faveur d'une communauté numérique interne forte, en tant que ressource indispensable à l'ambition scientifique du CEA dans les trois transitions.

Le numérique comme technologie capacitante pour le socle de recherche fondamentale du CEA

Les capteurs et l'instrumentation de pointe sont la base des grandes avancées scientifiques expérimentales ou observationnelles, que ce soit pour la détection de champs et rayonnements, les omiques, les imageurs de la médecine et de l'astrophysique, en passant par les nouvelles modalités de microscopie.

Les grandes installations de recherche et les grands instruments (IR, INBS, TGIR, satellites) sont au service de l'ensemble des grands défis scientifiques et bénéficient des avancées des technologies numériques à la fois au niveau de l'instrumentation et des traitements des données mais aussi, de façon analogue à l'usine du futur, pour leur conception, leur construction, leur exploitation, leur performance et leur démantèlement.

Le calcul et l'analyse de données haute performance (HPC et HPDA) sont au cœur des grands défis scientifiques tels le climat, l'astrophysique, la physique des particules, la biologie moléculaire, la santé des populations ou la médecine de précision. Des capacités de calcul accrues sont une priorité. Les futures machines exascale demandent un important effort de recherche et de génie logiciel pour permettre leur utilisation et atteindre des performances ultimes. L'apprentissage machine, les algorithmes innovant de traitement de données ou de simulation de phénomènes physiques et, demain, de nouveaux paradigmes de calcul comme le quantique ouvrent de nouvelles possibilités pour analyser, modéliser et simuler des phénomènes de plus en plus complexes, ainsi que des matériaux et dispositifs innovants, et pour maîtriser une masse toujours plus importante de données. Les nouveaux métiers de scientifique HPC, de Data-scientists et de bio-informaticien se développent. L'enjeu est de faire prospérer une communauté interactive pour accélérer la simulation et le traitement des données au CEA.

Le numérique au service des missions du CEA dans la transition énergétique

Le CEA participe par ses travaux de R&D à la transition énergétique. Pour le nucléaire il utilise les outils de simulations des petites échelles au système complet en passant par la physique du cœur. Une démarche de simulation similaire multi-échelles est mise en place pour comprendre le fonctionnement des composants et des systèmes (cellules PV, batteries, PAC, EHT), mais aussi des outils de simulations des réseaux d'énergie modulaires et hétérogènes.

Dans cette démarche, les nouvelles technologies du numérique mettant en œuvre le HPC, l'intelligence artificielle, l'évaluation systématique des incertitudes, le recours aux méta modèles... viendront plus que jamais renforcer la confiance dans ces simulations de systèmes d'énergie.

Les technologies de l'usine du futur sont indispensables pour la conception, la construction, l'opération, le démantèlement des installations en particulier nucléaires du CEA tout comme elles sont indispensables pour la compétitivité des industries européennes de production des technologies de l'énergie. Par exemple, l'effet d'échelle sur le démantèlement récurrent d'installations radioactives ne pourra être obtenu qu'avec une capitalisation numérique des travaux, permettant ensuite d'automatiser la conduite du chantier, et de sélectionner beaucoup plus finement le niveau de traitement des matières pour réduire son coût, de même que la production de composants de base des NTE (modules PV, électrolyseurs, batteries) ne sera possible en Europe qu'avec un niveau d'automatisation supérieur à celui des usines comparables dans les pays à bas coût de main d'œuvre.

Enfin, la cybersécurité est cruciale pour les grandes installations expérimentales du CEA et l'IA deviendra de plus en plus nécessaire à l'exploitation de leurs données.

Le numérique au service des missions du CEA dans la transition numérique aussi

La recherche technologique en micro/nano-électronique, nécessite des outils d'aide à la conception, à la fabrication et à la caractérisation permettant de calculer à l'avance les caractéristiques de ces composants de demain et le CEA possède des outils de référence en la matière. Les salles blanches sont elles-mêmes des usines comptant des centaines d'équipements de haute performance : pour les opérer au mieux, un traitement de données massif est en cours de mise en place.

De même la recherche dans les systèmes distribués incluant les architectures de calcul, les registres distribués (*distributed ledgers*) ou les systèmes de communication avancés requiert des outils d'ingénierie des systèmes cognitifs permettant des développements innovants.

Dans ces conditions, le CEA entreprend de compléter les outils commerciaux disponibles par des modules de conception développés en interne pour répondre à ses besoins propres en termes de R&D de rupture. Souvent, ces briques trouvent à leur tour des débouchés de valorisation auprès d'utilisateurs partenaires.

Le numérique au service des missions du CEA dans les technologies pour la médecine du futur

Le numérique est de plus en plus utilisé pour les deux principaux domaines d'application des technologies pour la médecine du futur : l'exploration du vivant et l'organisation des soins. La section ci-dessous esquisse la stratégie d'un axe du numérique dédié à la santé. Il sera détaillé dans le cadre de la réflexion sur la transition médicale conduite par ailleurs. C'est la raison pour laquelle il n'est pas développé au chapitre 5. Pour autant, **la MN souligne fortement l'importance de ce volet du numérique au sein du CEA.**

Les capacités d'exploration du vivant — *post mortem*, *in vitro* et *in vivo* — couvrant toutes les échelles depuis les molécules jusqu'aux populations, en passant par les organes en fonctionnement, constituent une révolution en cours de la biologie et de la médecine. La génomique d'un côté et l'imagerie des populations de l'autre en sont deux exemples emblématiques mais ils ne sont que la partie émergée de l'iceberg des données biologiques avec un nombre toujours croissant de molécules détectables et de modes de caractérisation multi-échelle. La complexité des données liée à la fois aux technologies employées, à leur masse et à leur dimension multimodale alliée à la complexité du vivant nécessite des traitements informatiques et des approches biologiques innovants.

Ces approches de bio-informatique sont très avancées au CEA comme le démontrent les 5 chaires IA obtenues à NeuroSpin, les premiers projets multi-omiques, les projets couplant les omiques et l'imagerie cérébrale ou encore les projets de jumeau numérique d'imagerie en tomographie par émission de positons intégrant le patient numérique et le système de détection. Le domaine de la santé nécessite ainsi à la fois des bases de données riches et robustes et des supercalculateurs permettant leur traitement massif. Ces technologies permettent d'envisager des traitements davantage personnalisés, soit en rapprochant les données d'un patient de celles contenues dans ces bases de données, soit en développant un jumeau numérique du patient dont la trajectoire temporelle sera guidée par l'analyse des bases de données. C'est l'un des enjeux du projet de plateforme numérique dédié à l'innovation en santé N4HCloud.

Au-delà des approches de bio-informatique, le développement du calcul embarqué dans les instruments augmente sensiblement les capacités d'exploration du vivant. L'analyse omique par IA en est un exemple, tout comme l'IA embarquée dans les nouvelles générations de détecteurs de positons.

L'organisation des soins est le second domaine applicatif dans lequel le numérique du CEA peut apporter une contribution majeure. L'enjeu est ici d'améliorer l'efficacité des soins en automatisant de nombreuses tâches dévolues aux soignants, en optimisant le « parcours patient », en renforçant les liens avec la médecine de ville et en développant des dispositifs médicaux plus performants. Cet enjeu couple l'ensemble des possibilités offertes par le numérique, depuis la virtualisation jusqu'à la robotisation en passant par toutes les technologies de l'électronique et des logiciels, pour les dispositifs médicaux innovants et également pour les assistants numériques personnels comme les smartphones. Les essais cliniques ont démontré la large supériorité d'une puce apprenante pour la délivrance du traitement de maladies chroniques, dans le cas du diabète. Le dispositif médical comporte également des capteurs que l'on veut toujours moins invasifs et qui deviennent de ce fait numériques, des dispositifs de transmission à très faible consommation. Ainsi, le CEA est en mesure de contribuer à l'innovation organisationnelle en santé, dont le principal défi reste la connexion entre les communautés de soin, de recherche académique et les industriels. L'acculturation entre ces communautés et l'accompagnement amont des projets constituent des approches pertinentes mises en œuvre dans les écosystèmes grenoblois, toulousain et saclaysien par les initiatives Hub4AIM, Innov'Pole Santé et PASREL.

L'IA et la robotique sont les technologies clés pour l'innovation organisationnelle, comme l'illustrent les projets récents portés par le CEA : assistance à la décision médicale en réunion de concertation pluridisciplinaire, analyse sémantique du système d'information hospitalier pour effectuer la cotation CPAM des actes réalisés ou pour produire la lettre de sortie du patient, projet de cobot en chambre d'hospitalisation. Les algorithmes d'IA de confiance revêtent une importance particulière dans le contexte médical. Le transport, le partage des données nécessite des communications rapides, sécurisées, fiables, interopérables. La cybersécurité est cruciale en raison de la sensibilité des données des patients.

A noter enfin une synergie clef entre la transition numérique et la révolution biologique, constituée par le dispositif médical à composante biologique. Un exemple porteur de rupture majeure est l'organoïde sur puce mariant la microélectronique, la microfluidique et les bio-technologies comme la maîtrise des cellules souches et de la fabrication de tissus biologiques.

Du point de vue des filières industrielles, les technologies de l'usine du futur sont nécessaires pour une production nationale ou européenne compétitive dans le domaine des médicaments ou des dispositifs médicaux. C'est notamment le cas des biothérapies dont la production pourrait être accélérée et dé-risquée par les capteurs intelligents développés au CEA.

Le numérique au service des missions du CEA dans la défense

La démarche de simulation pour les armes nucléaires et l'armement conventionnel est partagée par de nombreux programmes du CEA, depuis la recherche fondamentale en physique jusqu'aux projets de simulation multi-échelle des batteries. Elle nécessite la maîtrise de tous les piliers du HPC (conception et gestion d'un centre de calcul, pile logicielle et applications) et suscite des travaux sur les architectures de calcul au niveau matériel et logiciel. Le calcul embarqué et les systèmes distribués communicants sont également des technologies critiques avec des besoins défense spécifiques, dans des milieux complexes et contraints, a fortiori dans le cadre de systèmes d'armes futurs à forte composante décentralisée.

Les besoins en cybersécurité vont au-delà de la nécessité de garantir les exigences réglementaires sur les systèmes industriels et les systèmes d'information à différents niveaux de criticité. Le CEA doit être à l'avant-garde de l'identification des vulnérabilités et de la maîtrise des menaces de cybersécurité pour les installations et les technologies qu'il développe. C'est le cas de la prise en compte précoce de cette dimension dans l'interconnexion massive d'équipements et d'objets, que ce soit dans les réseaux électriques intelligents, l'internet des objets ou les réseaux basse consommation par exemple. L'expertise scientifique et technique du CEA est ainsi mobilisée au service du ministère des Armées.

Dans son activité industrielle au service de la dissuasion, le CEA met en œuvre des technologies numériques pour accélérer ses cycles de production, du bureau d'étude à la fabrication. Dans le domaine du nucléaire, militaire comme civil, il cherche à automatiser et robotiser les actions de démantèlement et les procédés de fabrication de matériaux radioactifs ou toxiques. Des jumeaux numériques des installations sont mis en place pour piloter l'ensemble du cycle de vie des installations.

Dans le domaine de l'intelligence artificielle, le CEA mène des actions de recherche spécifiques, dans l'objectif d'accompagner le développement de la chaîne de valeur industrielle et pour ses besoins propres (cybersécurité, simulation...). Les principaux axes de recherche identifiés, IA de confiance, IA embarquée et vision et traitement des langues, recoupent largement les besoins prioritaires exprimés récemment par le ministère des Armées.

Une articulation naturelle de la mission numérique avec le numérique intensif

Le HPC/HPDA constitue aujourd'hui une thématique transverse au sein du CEA, et occupe une place croissante dans toutes les activités de l'organisme, que ce soit sur le plan fondamental comme sur le plan technologique et applicatif. Les activités du CEA sont distribuées au sein de toute la chaîne de valeur, depuis la recherche sur les nouvelles architectures matérielles jusqu'au développement applicatif de grands codes de simulation, en interne ou en partenariat. Enfin, il exploite de grands centres de calcul pour ses besoins propres et au profit de communautés industrielles (CCRT) et scientifiques (TGCC).

Afin de piloter et structurer ces activités, et notamment dans l'optique de la mise en place d'une stratégie d'organisme vis-à-vis des partenaires extérieurs (français et européens), une organisation est mise en place. En s'appuyant sur les programmes des différentes DO, cette stratégie reposera sur cinq piliers : R&D amont, co-conception industrielle, infrastructures, intergiciels et plateformes logicielles, usages et adaptation des applications.

Les champs couverts par la mission numérique et le numérique intensif sont fortement reliés et s'articulent naturellement. Ainsi au sein de la mission numérique, le volet usage et adaptation des applications du numérique intensif est mentionné dans le chapitre 4.c, les actions de R&D amont et de co-conception industrielle sont présentes dans l'axe « Solutions matérielles et logicielles pour accompagner les voies du calcul » (§5.a) tandis que les travaux sur les intergiciels, les plateformes logicielles et les applications HPC et HPDA se retrouvent au sein des actions proposées pour améliorer la transversalité via l'animation de plateformes mutualisées (§6.d).

La mission numérique recommande que le numérique intensif soit mentionné, dans les présentations externes du CEA concernant son action dans le numérique, en précisant si nécessaire qu'il a une gouvernance propre au sein du CEA compte-tenu de son importance pour les programmes de l'établissement.



5. AXES FORTS DU CEA

Résumé

La réflexion des groupes de travail a fait émerger 8 axes forts qui représentent des enjeux reconnus au plan international dans le domaine numérique et qui structurent l'action du CEA. Le CEA dispose d'atouts incontestables sur chacun de ces axes - en termes de compétences et de masses critiques pour s'imposer comme un acteur majeur du numérique de demain. Ces axes servent de vastes domaines d'application : la santé, l'énergie, les produits industriels et duals, la fabrication industrielle (usine du futur) et les grandes installations scientifiques (dont les besoins sont proches). Le cœur formé par le triptyque perception numérique, calcul, et systèmes distribués communicants & intelligents irrigue l'ensemble de ces axes, et les axes cyber sécurité et IA de confiance sont transversaux à toutes les applications.

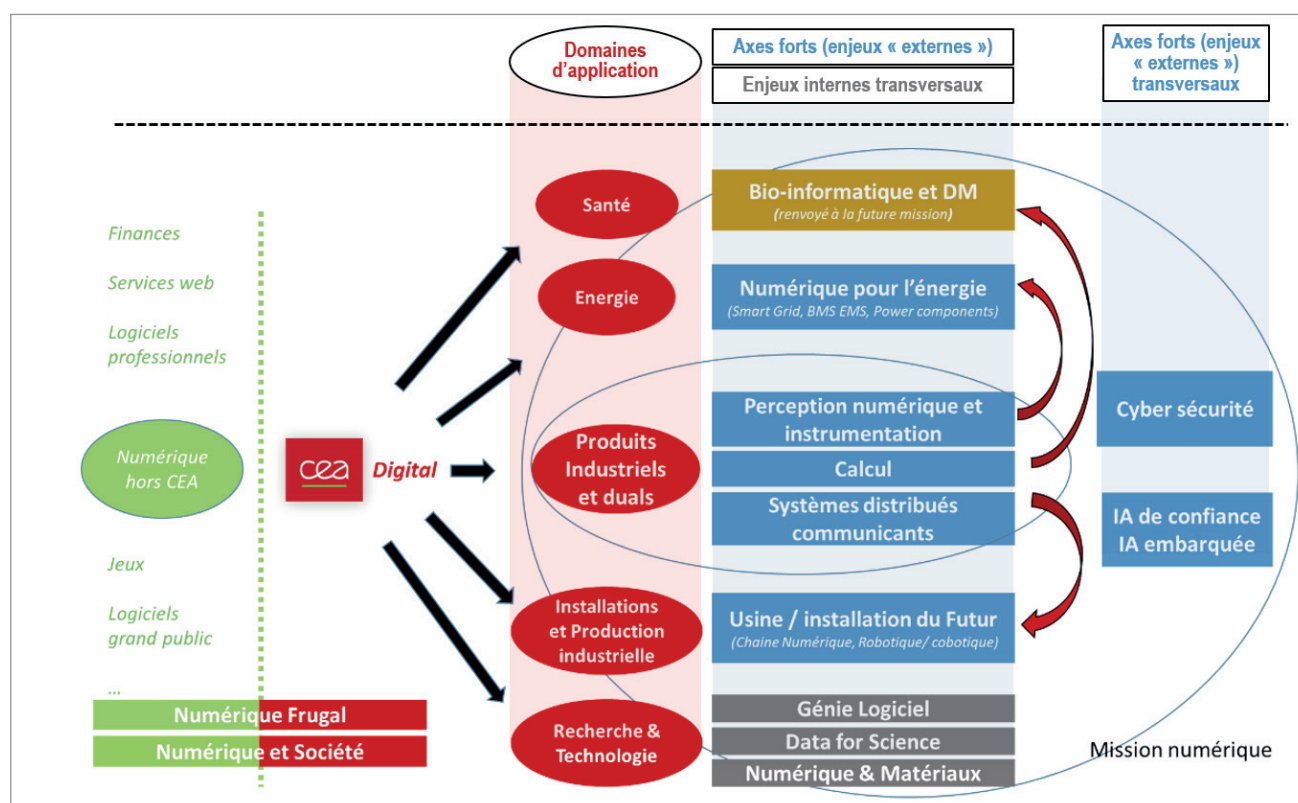
A ces axes forts que le CEA pourra rendre visibles de l'extérieur, il convient d'adjoindre 3 enjeux internes transversaux du numérique pour la science développée au CEA. Nous suggérons pour ces trois enjeux, une démarche de mutualisation, afin d'optimiser la qualité des solutions mises en œuvre au profit de tous les laboratoires, dans un champ où les compétences sont particulièrement disputées. Ils correspondent aux enjeux du génie logiciel, des « data for science » et du numérique pour les matériaux.

Enfin, deux enjeux majeurs, relativement récents, du numérique, frugalité et impact sociétal, nous paraissent devoir appeler une mobilisation particulière du CEA. L'enjeu de frugalité pour le numérique sera déterminant dans les années qui viennent. La multiplication des objets connectés et intelligents en très grande quantité, va demander des approches et des solutions innovantes, un effort technologique dédié. C'est la raison pour laquelle, nous proposons d'en faire un axe, à part entière.

Ces axes sont évidemment loin de couvrir tout le champ du numérique, le CEA se concentre sur les domaines où il est compétitif au niveau international et où il apporte une différenciation par rapport aux autres acteurs nationaux du numérique (Inria, CNRS...).

La réflexion des groupes de travail a fait émerger 7 axes forts qui représentent des enjeux reconnus au plan international dans le domaine numérique et qui structurent l'action du CEA. Le CEA dispose d'atouts incontestables sur chacun de ces axes — en termes de compétences et de masses critiques — pour s'imposer comme un acteur majeur du numérique de demain. Comme illustré ci-dessous, ces axes servent de vastes domaines d'application : la santé, l'énergie, les produits industriels et duals, la fabrication industrielle (usine du futur) et les grandes installations scientifiques (dont les besoins sont proches). Le cœur formé par le triptyque perception numérique, calcul, et systèmes distribués communicants & intelligents irrigue l'ensemble de ces axes, et les axes cyber sécurité et IA de confiance sont transversaux à toutes les applications.

A ces axes forts que le CEA pourra rendre visibles de l'extérieur, il convient d'adjoindre 3 enjeux internes transversaux du numérique pour la science développée au CEA. Nous suggérons pour ces trois enjeux, une démarche de mutualisation, afin d'optimiser la qualité des solutions mises en œuvre au profit de tous les laboratoires, dans un champ où les compétences sont particulièrement disputées. Ils correspondent aux enjeux du génie logiciel, des « data for science » et du numérique pour les matériaux.



Deux enjeux majeurs, relativement récents, du numérique, frugalité et impact sociétal, nous paraissent devoir appeler une mobilisation particulière du CEA. L'enjeu de frugalité pour le numérique sera déterminant dans les années qui viennent. Il appelle un effort technologique dédié. C'est la raison pour laquelle, nous proposons d'en faire un 8^e axe, à part entière. Cet enjeu sur l'empreinte carbone du Numérique est tout à fait central. La multiplication des objets connectés et intelligents en très grande quantité, va demander des approches et des solutions innovantes.

Enfin un 9^e axe, le numérique pour la médecine du futur, a été esquissé dans le chapitre 4c. La MN l'identifie comme un volet essentiel. La raison pour laquelle il n'est pas approfondi dans ce chapitre tient simplement au fait que la réflexion plus générale sur la médecine du futur, à venir, a vocation à le préciser et l'enrichir.

Ces axes sont évidemment loin de couvrir tout le champ du numérique, le CEA se concentre sur les domaines où il est compétitif au niveau international et où il apporte une différentiation par rapport aux autres acteurs nationaux du numérique (Inria, CNRS...). L'intégralité des rapports fournis par les groupes de travail se trouvent dans l'annexe E1. Ci-dessous un résumé des enjeux et des axes de recherches proposés.



a. AXE1 – Solutions matérielles et logicielles pour accompagner les voies du calcul

Enjeux : Les systèmes de traitement de l'information sont à la base de toutes les applications du numérique. Les processeurs de calcul sont partout, dans une distribution qui évolue en fonction d'une part des besoins croissants d'intelligence des objets, d'autre part des contraintes de temps de réponse et de consommation (cloud vs local). Le fonctionnement, la compétitivité d'un nombre sans cesse croissant de produits industriels, médicaux, scientifiques reposent sur les composants de calcul qu'ils embarquent. Ceux-ci sont ainsi des enjeux grandissants de souveraineté économique, et de défense. Le CEA doit contribuer à la maîtrise nationale des technologies de calcul, au soutien des industriels pour les solutions de marché actuelles, et en éclairer pour préparer des solutions à plus long terme. Techniquement les efforts restent concentrés sur les deux défis de la miniaturisation et de la réduction de la dissipation des circuits pour une augmentation continue des performances [Loi de Moore, 1965]. Mais les solutions se ramifient : l'augmentation de densité des circuits par la réduction continue de la taille des motifs ne peut plus être la voie unique pour les processeurs de calcul (CMOS) pour toutes les classes d'applications. On observe une co-optimisation design-technologie-besoin utilisateur qui amène de la spécialisation des processeurs (unités d'accélération graphique, processeurs génériques, accélérateurs pour calculs tensoriels pour intelligence artificielle...). Cela se traduit par une nouvelle voie [More-than-Moore, 2010] à côté de la route « nœuds ultimes » émergent. Cette voie fait appel à de nouveaux matériaux, de l'intégration 3D appliquée également à l'intégration de chiplets sur interposeur, de nouvelles architectures où le calcul se rapproche de la mémoire, ou plus spécialisée sur des tâches comme l'IA, ou le calcul parallèle intégrant des couches logicielles de plus en plus efficaces et optimisées pour exploiter la diversité de ces nouvelles architectures. Enfin, de nouveaux paradigmes de calcul comme le calcul quantique se dessinent à plus long terme. Des ruptures sont nécessaires pour améliorer l'impact carbone du calcul, tant en énergie qu'en consommation de matières rares. La multiplication des données et l'augmentation rapide et en masse des objets connectés et intelligents pourrait multiplier par x4 à x5 l'impact du numérique actuel estimé entre 4-5 % des émissions totales. Le CEA doit s'investir dans ces technologies, qui sont autant de marchés en phase d'éclosion et encore ouverts à des industriels européens.

Atouts du CEA : Le CEA est le seul acteur en France qui couvre toute la gamme du calcul de la recherche fondamentale à la mise en œuvre au quotidien en s'appuyant sur les développements logiciels et les technologies matérielles. Pour réaliser l'une de ses missions stra-

tégiques le CEA (DAM) doit assurer des capacités de simulation au plus haut niveau. Ainsi il conçoit et exploite des centres de calculs et traitement de données accueillant des super-ordinateurs qui sont parmi les 25 plus puissants au monde. Sa position lui permet de réfléchir et de proposer actuellement des architectures dédiées à ses besoins futurs en s'appuyant sur des puces de calcul existantes ou à créer. L'avenir des super-ordinateurs devra aussi intégrer l'arrivée future mais probable des technologies quantiques. Dans le cadre de sa mission pour l'industrie (DRT) le CEA est à la pointe dans les systèmes de calculs embarqués, aussi bien pour la partie technologique que dans les architectures innovantes, dans leurs logiciels frugaux et dans les moyens de les concevoir. Le CEA est aussi incontournable quand il s'agit de réaliser et de maîtriser des systèmes de traitement de l'information complexes et souverains à la fois logiciel et matériel. Le CEA dispose de toutes les expertises nécessaires à la conception, le développement et la mise en œuvre des technologies nécessaires à la chaîne de traitement numérique de l'information. Il est ainsi le mieux placé pour porter des ruptures technologiques de l'innovation à son application à des cas pratiques par son implication sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Le CEA est à l'origine de technologies du semi-conducteur permettant de faire des circuits à très faible consommation (FDSOI), en production chez plusieurs majors du semi-conducteur. Nos architectures ont été transférées à des industriels, et des startups sont nées grâce à nos innovations sur les logiciels sûrs ou pour des systèmes pouvant être utilisés dans les voitures de demain pour n'en citer que deux. Pour continuer à assurer ces missions, et soutenir les positions françaises dans ce domaine, le CEA doit donc continuer à être un acteur dans le développement de solutions matérielles et logicielles pour le calcul de demain. Cette position permet au CEA de pouvoir proposer des solutions à forte valeur ajoutée et à empreinte carbone maîtrisée voir réduite.

Axes de recherche proposés : Quel que soit le degré d'indépendance technologique dont se dotera la France et l'Europe, il est essentiel de maintenir au CEA (en coopération accrue avec d'autres organismes) un corpus de compétences sur les différents savoir-faire et technologies. Cet effort est indispensable pour maîtriser les différents systèmes de traitement de l'information et supporter, par exemple, le développement de solutions de calcul dans les domaines de l'Intelligence Artificielle embarquée, du calcul Quantique, en parallèle avec les domaines plus traditionnels de la simulation. Il est aussi important de supporter l'évolution vers le continuum numérique afin que le calcul soit effectué où il est le plus efficace et d'être à la pointe dans les évolutions des modèles de calcul, comme par exemple, le calcul à la périphérie et fédératif en référence à l'IA embarquée, les approches de jumeau numérique, et les solutions de calcul hybrides en référence à la simulation. L'accélération des flots de design logiciels/matériels permettant de maximiser la productivité et la qualité est un contributeur essentiel à la compétitivité du CEA dans ce domaine. Cela ne pourra se faire qu'à travers des approches de co-conception en lien étroit avec le savoir-faire applicatif. Les développements ont pour objectifs de rester dans la course pour des éléments cruciaux au fonctionnement des machines de calcul. Ils doivent se faire principalement suivant 3 volets :

Volet technologique :

Le CEA concentrera ses efforts sur :

- Le soutien à la technologie FDSOI notamment en direction des boosters de performance et de la mise au point éventuelle de nœuds plus fins jusqu'à 10 nm.
- L'amélioration des technologies de mémoires non volatiles PCRAM et OxRAM notamment permettant de réaliser des réseaux de neurones performants et l'exploration des possibilités offertes par la spintronique notamment en termes de mémoires magnétiques et de circuits hybrides

- La recherche de solutions de rupture permettant de gagner des décades en performance, notamment en améliorant drastiquement le coût des transferts de données entre le calcul et la mémoire, actuellement restés encore très coûteux en énergie. Pour cela les voies explorées nécessitent de l'innovation à tous les niveaux de la pile technologique (matériaux, dispositifs, composants, modèles de calcul, architectures, logiciels). Une co-conception sera nécessaire pour aligner les applications aux nouvelles architectures de calcul via une intégration plus profonde des couches logicielles et matérielles.
- Une veille active sur les concepts de transistors avancés. Le CEA a été pionnier sur les architectures à nanofils à grille volumique (GAA), aujourd'hui annoncés par les deux fonderies asiatiques comme une piste nouvelle pour les nœuds ultimes.
- La technologie d'empilement 3D séquentielle utilisée en complément de la miniaturisation extrême pour augmenter la capacité de traitement à surface identique, et une meilleure intégration entre calcul et mémoire.
- Enfin, la continuation de l'intégration de la photonique in-silico en lien avec une meilleure efficacité entre le calcul et les mémoires dans les architectures de calcul massif.

Volet architecture :

Le CEA concentrera ses efforts sur :

- Les architectures HPC, pour poursuivre l'augmentation de la performance des architectures de calculs des super-ordinateurs :
 - Réduction du temps passé dans la synchronisation entre processeurs avec des mécanismes de « barrières » matériels et logiciels, et une plus grande efficacité des mécanismes de cohérence mémoire.
 - L'enrichissement des sous-systèmes mémoires de **mécanismes matériels de réalignement dynamique** (eg stencils), de pré-chargement (prefetch) voire leur transformation en utilisant les capacités d'intégration des nouvelles technologies mémoires.
 - L'utilisation de coprocesseurs de calcul flottant matériels où d'accélérateurs matériels utilisant des formats en précision augmentée.
- Les architectures 3D avec empilement de puces pour optimiser les fonctions dédiées de calcul, de réseaux de neurones et de capteurs.
- La désagrégation des circuits intégrés monolithiques en une combinaison de circuits plus petits et réutilisables (chiplets) assemblés sur un support générique appelé interposeur ;
- Les architectures pour le calcul dans la mémoire
- La conception de circuits dédiés aux applications d'apprentissage profond, permettant d'optimiser à la fois les phases d'apprentissage en local et d'exécution, exploitant notamment des mécanismes neuromorphiques
- La conception de circuits à haute performance pour des applications de souveraineté

Les architectures nécessaires pour accueillir les technologies quantiques :

Le CEA est un acteur important du plan quantique national. Il intervient en particulier dans le domaine :

- Des machines LSQ, en développant une technologie à base de Qubits de spin sur silicium pour laquelle il vise la réalisation d'un prototype à 100 Qubits en 2024, puis une machine opérationnelle (> 10 MQubits avec code correcteur) à l'horizon 2030
- Des qubits supraconducteurs avec un potentiel de cohérence quantique supérieur à celui des qubits supraconducteurs actuels, notamment des spins couplés à des circuits supraconducteurs ou des qubits volants dans des gaz électroniques bidimensionnels
- Des algorithmes et de la pile logicielle

Recommandations de mise en œuvre : le CEA a la chance de disposer à la fois de compétences importantes au niveau de la recherche fondamentale qui crée les concepts, et au niveau de la recherche appliquée où les concepts sont transformés en dispositifs et preuves de concept, qui parfois évoluent jusqu'à leur passage au stade industriel. Il met déjà en œuvre leur complémentarité au travers de projets intégrés dans les domaines de l'IA embarquée et du quantique (qubits de spin sur silicium) allant jusqu'à l'aménagement de plateaux de recherche partagés en équipe commune. Cette approche par projet est appelée à se multiplier pour les sujets les plus en rupture comme notre recommandation pour le calcul frugal. Elle est complétée par des collaborations extérieures, avec le CNRS, l'Inria ou les universités, par exemple.

Il est essentiel de maintenir au CEA un corpus de compétences sur les différents savoir-faire et technologies, afin de maîtriser les différents systèmes de traitement de l'information et de supporter le développement de solutions de calcul plus avancées (AI embarquée, calcul quantique...), en parallèle avec les domaines plus traditionnels de la simulation.

Les développements ont pour objectifs de rester dans la course pour des éléments cruciaux au fonctionnement des machines de calcul. Ils doivent se faire principalement suivant 3 volets : technologique, architecture et architectures pour les technologies quantiques.



b. AXE2 – Systèmes de calcul distribués communicants

Enjeux : De nouvelles générations de systèmes distribués communicants se développent à différentes échelles pour répondre aux besoins grandissants en puissance de calcul, mobilité, scalabilité, et redondance de nombreuses applications.

L'augmentation du débit et la réduction de la latence des télécommunications ont été spectaculaires dans la dernière décennie. Pourtant des ruptures encore plus importantes sont attendues, ouvrant la voie à l'hyper connectivité et à des applications majeures permises par la transmission instantanée de jumeaux numériques de grande précision. La décentralisation

vers des systèmes répartis est une autre tendance forte, portée par les besoins de sécurisation et de frugalité. La parallélisation et la distribution des processeurs posent des problèmes techniques et imposent de développer une algorithmique tenant compte de la distribution des calculs et des données, d'assurer une communication à très haut débit et grande fiabilité entre les différentes entités du système distribué et en assurant la sécurité totale des données qui circulent, ainsi que la fiabilité et la tolérance aux pannes et défaillances locales.

Pour répondre à ces défis trois axes de recherches sont envisagés : les communications quantiques, les réseaux et technologies de communication de nouvelle génération et les technologies décentralisées de sécurité comme la *blockchain*. Les compétences du CEA dans les systèmes distribués forment un socle de connaissances et savoir-faire au cœur du numérique essentiel pour les solutions de demain. Ce domaine demande un savoir-faire d'intégration technologique très fort. Armé de ses compétences, de la renommée internationale de ses équipes et de ses partenaires industriels, le CEA a vocation à s'affirmer comme un acteur incontournable du domaine qui est une voie d'évolution possible du numérique.

Forces du CEA : Dans les communications quantiques, des équipes du CEA ont joué un rôle pionnier pour le développement de composants photoniques comme les sources d'états quantiques à fil photonique. La plateforme technologique du LETI a acquis ces dernières années un très bon niveau de maturité en photonique sur silicium avec le développement de guides d'onde à très faibles pertes et de toute une bibliothèque de composants intégrés passifs et actifs pour les communications classiques télécom et datacom. Cette plateforme qui constitue une excellente base pour développer des composants spécifiques très performants pour les communications quantiques. Une première démonstration de génération de paires de photons intriqués en temps-énergie a été faite en 2019 et le développement de détecteurs supraconducteurs intégrés est en cours. Enfin, le CEA a mis en place un groupe théorique (DRF/IPhT) travaillant notamment sur les protocoles de communications quantiques opérant sur de grandes distances et avec des garanties de sécurités sans précédent.

Dans les télécommunications, le CEA mène des actions de recherche au soutien des filières industrielles, de la microélectronique jusqu'aux applications en passant par l'intégration système. Il fait un effort particulier dans le domaine du mmW qui préfigure la 6G, tant dans le domaine des formes d'onde (modulation) que du protocole, le tout visant le très haut débit (100 Gbps), mais aussi des structures antennaires et des systèmes frontaux radiofréquence évolués. Le CEA a été également pionnier du développement des composants RF et des nouvelles technologies (silicium, matériaux magnétiques, substrats innovants), des antennes, du réseau défini par le logiciel (SDN) avec la plateforme logicielle NEON spécialisée Edge.

Dans les systèmes répartis le CEA est un acteur important de la *blockchain*. Il a notamment contribué à la mission interministérielle « les verrous technologiques de la *blockchain* » en 2019, aux côtés d'Inria et IMT, et s'intéresse aussi au couplage entre *blockchain* et IoT et au développement de primitives de cryptographie adaptées à l'embarqué.

Axes de recherches proposés : Ils concourent à un objectif global de sécurité, résilience et performance des systèmes distribués, qui sont de plus en plus ouverts, hétérogènes, à topologie variable et dynamique — des facteurs qui peuvent augmenter leur vulnérabilité. Il faut rendre fiable et efficace la transmission, le stockage et le traitement de l'information potentiellement répartie sur un grand nombre de nœuds, face à des adversaires de plus en plus intelligents. Les travaux se déploient sur 3 axes :

- Les communications quantiques : il s'agit de développer les protocoles et composants nécessaires au déploiement des communications quantiques. Le CEA cherche en priorité à lever des limitations actuelles majeures, telles que la faible portée des liaisons fibrées ou la vulnérabilité des systèmes dues aux imperfections des composants. Les principaux développements envisagés sont :
 - Le développement de protocoles nouveaux permettant de garantir la confidentialité des communications avec des systèmes fiables, résistants aux attaques, notamment lorsqu'il n'est pas possible de maîtriser la conception et la fabrication des équipements qui seront mis en œuvre dans les infrastructures numériques. La solution proposée consiste à développer un système de distribution de clé dit *device-independent*.
 - Améliorer les performances de composants existants et développer les briques de base nécessaires manquantes pour les communications quantiques. Consolider les travaux sur les sources déterministes de photons uniques et explorer les sources de paires de photons enchevêtrés en vue de la réalisation de relais efficace pour les réseaux quantiques.
 - Intégrer sur une puce SOI l'ensemble des composants photoniques nécessaires à la génération, manipulation et détection/mesure de photons uniques pour mieux répondre aux besoins des communications quantiques.
- Les réseaux et télécommunications :
 - Développer une solution complète de bulle de connectivité pour accompagner le développement de la numérisation de l'industrie.
 - Démontrer la connectivité multicouches physiques (liens mmW très faible latence, lien IoT très basse consommation).
 - Exploiter les technologies émergentes pour intégrer des solutions logicielles de gestion avancée des communications/réseaux permettant de disposer d'une solution de confiance pour l'intégration de fonctionnalités de communication différenciantes.
- Les systèmes répartis : L'objectif ultime est de développer des nouvelles technologies distribuées pour la confiance décentralisée. Les développements concernent :
 - Les algorithmes de consensus et les mécanismes de cryptographie pour sécuriser les communications entre les objets et le système de stockage distribué
 - Les ateliers de spécification, conception et validation qui permettent de fournir des solutions de confiance
 - Les développements scientifiques et techniques pour aboutir à un objet technologique directement transposable sur le marché : la blockchain verte pour l'IoT/Edge.
 - Une recherche plus exploratoire sur l'extension des technologies pour la confiance à des systèmes permettant d'établir des responsabilités certifiées, automatiquement intégrables aux blockchain ciblées.

Recommandations de mise en œuvre : Les compétences nécessaires aux travaux sur les systèmes communicants sont actuellement réparties dans plusieurs instituts des différentes DO du CEA. Par exemple, les compétences pour la communication quantique viennent de la DRF pour les preuves de sécurité les plus avancées, de la DRT pour la fabrication de sources de photons et détecteurs supraconducteurs intégrés sur puce silicium, de la DRF pour les

caractérisations quantiques et d'expériences de photonique quantique, et de l'expertise DRT en cybersécurité des systèmes, avec leurs compétences en attaques et sécurisation de systèmes (HW SW). Un premier effort de construction a permis d'identifier des transversalités entre équipes et directions opérationnelles au sein de chaque domaine, pour parvenir à l'esquisse d'une feuille de route commune. Il serait intéressant de se rapprocher des domaines applicatifs et formuler des solutions complètes (logiciel/matériel) clé en main, par exemple pour l'économie circulaire ou les télécommunications. Cela impliquerait une collaboration plus étroite Inter DO (voir propositions de la section 6).

Les axes de recherche proposés concourent à un objectif global de sécurité, résilience et performance des systèmes distribués, lesquels sont de plus en plus ouverts, hétérogènes et à topologie variable et dynamique, ce qui peut augmenter leur vulnérabilité. Il est indispensable de rendre fiable et efficace la transmission, le stockage et le traitement de l'information potentiellement répartie sur un grand nombre de nœuds, face à des adversaires de plus en plus intelligents. Pour cela les travaux se déploient sur 3 axes : les communications quantiques, les réseaux et télécommunications et les systèmes répartis.



c. AXE3 – Perception numérique, capteurs avancés et instrumentation

L'enjeu : Les performances des capteurs sont en évolution permanente grâce à l'apparition de nouveaux concepts de détection, aux développements technologiques (miniaturisation, fonctionnalisation, multi-modalités...), à leur capacité de traitement local et à l'émergence d'algorithmes à base d'Intelligence Artificielle (IA). Les capteurs innovants sont un élément fondamental de l'instrumentation scientifique, de l'imagerie spatiale, des avancées des phénomènes quantiques, en passant par les neurosciences, le monitoring des gaz à effet de serre et la détection de rayonnements par exemple. L'instrumentation scientifique contribue aussi à la souveraineté numérique.

Les capteurs et les écrans sont également au cœur d'un nouveau domaine en plein essor autour de la perception numérique multisensorielle (vision, toucher, son, ...) qui s'impose comme un volet majeur de la chaîne du numérique en mariant de plus en plus intimement les mondes réels et virtuels. La perception numérique intègre à la fois les informations environnementales et la capture de l'activité d'un utilisateur (gestuelle, posture, paramètres physiologiques, émotions...) pour déterminer son état cognitif et lui restituer une information ciblée et multisensorielle par le biais d'interfaces homme-machine avancées. La perception numérique trouve des applications dans de nombreux secteurs industriels : l'usine du futur, le nucléaire, la médecine, la défense, la voiture autonome et les objets grand public. Le nombre et la taille moyenne des écrans sont appelés à doubler dans les prochaines années, à la faveur de l'augmentation de leur qualité (définition, brillance, consommation), de la réduction de leur coût et des nouvelles fonctionnalités décrites ci-dessus. Le déploiement d'un univers virtuel dual, sans couture entre le domicile, le travail, la mobilité et le plein air, en interaction plus fluide et plus riche avec l'utilisateur grâce à des moyens de commande plus naturels que le clavier (voix, regard, émotions), progressera avec les capacités des composants de la perception numérique. C'est aussi un enjeu industriel considérable. Les ruptures technologiques dans le

domaine des capteurs et des écrans ouvrent des possibilités de marché pour l'industrie européenne, que des acteurs comme ST (imageurs visibles), Lynred (IR) et des startups comme Aledia (écrans) ont commencé à saisir. Les imageurs intégrés pour la mobilité autonome et la détection, les LIDARS, les capteurs physiologiques non invasifs pour les dispositifs médicaux ou encore les capteurs gaz représentent des marchés de masse également à la portée de l'industrie nationale. Outre les applications industrielles ci-avant, les domaines de la science, de la santé et de l'agriculture seront concernés et à la recherche tôt ou tard de ces avancées.

Forces du CEA : Le CEA se positionne sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'instrumentation et de la perception : de la spécification à l'application réelle finale, en passant par la conception, la préparation, l'architecture, la qualification en environnement et le durcissement pour des usages en conditions extrêmes. Le CEA possède une grande expertise amont en physique et chimie, permettant d'être force de proposition pour des capteurs de rupture. Cette expertise amont s'appuie sur des moyens techniques uniques depuis les plates-formes technologiques et expérimentales jusqu'aux moyens de traitement et d'analyse scientifique des données. Les simulations numériques pour prédire et optimiser le comportement des capteurs occuperont une place importante dans ce processus. Pour l'instrumentation, la compétence au CEA s'étend des technologies ultimes (incluant leurs environnements spécifiques, très basse température, très faible signal, très bas bruit) aux applications, grâce aux plateformes de micro-(nano) fabrication à différentes échelles (celles de pré-prototypages rapides comme l'AdN à Saclay ou la PTA à Grenoble, jusqu'au prototypage industriel et démonstrateurs comme Minatoc). Pour la perception, le CEA maîtrise toute la chaîne de valeur des IHMs avancées, allant du capteur jusqu'à l'analyse du comportement de l'utilisateur et des usages, en passant par l'analyse des signaux et l'intelligence artificielle. Ce domaine nécessite une collaboration étroite entre différentes disciplines (capteurs, MEMS, mécanique, électronique embarquée, informatique, traitement du signal, ergonomie, psychologie et facteurs humains) ainsi qu'une connaissance des domaines d'applications très variés. La multidisciplinarité des activités et des profils est clairement un atout du CEA pour se positionner en tant que leader sur le domaine des IHMs avancées.

Axes de recherches proposés :

- **Dans le domaine de l'instrumentation scientifique**, une attention particulière est portée aux briques technologiques et à leur spécialisation par le traitement local de l'information de faible latence, avec des méthodes IA susceptibles d'en spécialiser les applications. Des ruptures pourront être obtenues en instrumentation scientifique si on parvient à doter les capteurs scientifiques haute performance d'une sensibilité ultime. Cette sensibilité pourrait être atteinte par l'intégration aux capteurs de fonctions d'analyse du signal reposant sur l'interprétation des mesures par IA. Finalement on cherche à disposer d'une de solutions versatiles basées sur des briques technologiques et des savoir-faire dont les usages et les performances peuvent être amplifiés. Les travaux se feront dans trois directions :
 - Les capteurs quantiques dits « 2.0 » permettant d'utiliser directement les propriétés quantiques dans leur principe. Détecteurs et sources de photons uniques et détecteurs de spins sont des exemples qui trouveront des débouchés dans les secteurs des technologies quantiques de l'information et de la métrologie à moyen terme. A plus long terme, ils impacteront le développement de l'ordinateur quantique.
 - D'autres types de détecteurs très sensibles, voire ultimes (détection d'objets élémentaires, de particules ou de photons uniques) et des instruments scientifiques intelligents permettront à moyen terme la création de plateformes multimodales.

- L'identification de briques technologiques génériques avec un potentiel multi-usage doit être conduite à court terme et donnera lieu à une offre nouvelle de plateformes industrialisables à plus long terme. Ceci implique dans l'immédiat le rapprochement des techniques d'instrumentation et de traitement du signal par IA, sans omettre à moyen terme les notions clé de confiance, de robustesse et d'intelligence embarquée.
- **Dans le domaine de l'IHM**, le CEA couvre le périmètre des interfaces multisensorielles, des capteurs comportementaux et ambiants, ainsi que de la réalité étendue. Ces IHM avancées seront adaptées aux voies ouvertes par la 6G, comme la télé-présence. Les recherches seront concentrées sur les futures générations d'écrans et les IHM multisensorielles intégrant la vision, l'audio et l'haptique comme modalités d'interaction bidirectionnelles (captation et restitution de chacune des modalités) :
 - Combinaison de la visualisation et de l'émission/retour haptique et audio sur des écrans de différentes tailles;
 - Dynamique d'image et richesse colorimétrique inégalées pour les nouveaux écrans immersifs basés sur les « smart pixels » à base de microleds;
 - Passage d'un pixel classique à un pixel multisensoriels « le PITAUCEL » (pixel qui émet une lumière, mais aussi du tactile TAXEL et de l'AUDIO directif) et optimisation de la résolution de chacune des modalités;
 - Génération automatique et affichage des informations adaptées en fonction des états émotionnels relevés et du contexte environnant;
 - Retour sensoriel haptique sur écran, puis dans l'air.
- **Dans le domaine des capteurs industriels :**
 - **La vision :** le CEA cultivera sa compétence large imageurs (visibles, infrarouges, LIDARs, temps de vol). Il développera aussi des capteurs plus intelligents intégrant des traitements proches capteurs grâce à l'intégration 3D et au traitement par algorithmes IA évènementiels (neurones à spike). Il s'attachera aussi à la visualisation de données massives et hétérogènes, avec des applications telles que la gestion de crise, les données médicales, la neurobiologie, la cybersécurité, l'analyse de particules, le réacteur numérique ou la logistique.
 - **Le toucher :** les recherches du CEA se focalisent sur l'utilisation du toucher comme moyen de communication, à la fois pour l'entrée de données et pour la présentation d'information numérique. Cet aspect bidirectionnel de l'interaction est l'une des spécificités du canal haptique humain qui permet de percevoir des informations sur la texture, la température, les mouvements ou le poids des objets avec lesquels le sujet interagit. L'usage de nouveaux types de capteurs permet l'implémentation de nouveaux algorithmes de traitement (ex. : retournement temporel, filtrage inverse) pour créer un rendu haptique localisé de haute définition.
 - **Le son :** le CEA est positionné sur l'audible et les ultrasons, ainsi que sur l'ensemble de la chaîne de traitement du signal, maîtrisant les technologies allant du matériau jusqu'au système. A titre d'exemple, le CEA développe de nouvelles générations de microphones et haut-parleurs surfaciques associés à des algorithmes de contrôle actif permettant de contrôler les vibrations sur une surface et de propager le son de manière directive. Cette approche permet de créer des « bulles de silences » dans des environnements bruyants et, plus généralement, de spatialiser le son.

- **Capteurs sensoriels, capteurs comportementaux et de charge mentale** : la capture de mouvements tend maintenant vers la reconnaissance automatique de gestes/postures et vers une représentation volumique et photo réaliste de l'utilisateur (vidéo avatar). Elle peut être associée à un mannequin numérique représentatif. Plus récemment, la capture des émotions (ou affective computing) se développe à partir de capteur d'images, de sons et de wearables physiologiques (montres, implants). Ces recherches visent l'analyse plus ou moins indirecte de l'état cognitif et affectif de l'humain.
- **Capteurs ambiants** : le CEA développe des technologies de capture d'ambiance à distance (images, sons, ondes radar ou acoustiques, gaz). Il développe également des technologies de capture par propagation (capture des vibrations permettant d'analyser l'état de la chaussée ou la qualité de l'air).
- **Fusion de données multi-capteurs** : ces technologies synthétisent l'information provenant de dizaines de capteurs différents pour effectuer des traitements plus avancés (type IA) exploitant les données collectées. Les algorithmes de fusion de données multi-capteurs sont nécessaires aux IHM nouvelles générations, pour réduire le volume d'information présenté à l'utilisateur et en extraire, de manière automatique, des synthèses.

Recommandations de mise en œuvre : Les qualités et la diversité des recherches menées au CEA ont pour corollaire une certaine dispersion des compétences. Les transversalités existent (Programmes Transversaux de Compétences et Programme Exploratoire, Thèses et FOCUS, collaborations internes...) en dépit de modèles économiques différents selon les DO. En l'état, les moyens de réseautage internes existants sont insuffisants. L'amplification de moyens incitatifs et l'amélioration des échanges interdisciplinaires sont nécessaires, comme proposé dans la section 6.

Dans le domaine de l'instrumentation scientifique, l'accent devra être mis sur les briques technologiques et leur spécialisation par le traitement local de l'information de faible latence, ainsi que sur le développement de capteurs scientifiques haute performance d'une sensibilité ultime.

Dans le domaine de l'IHM, celles développées par le CEA devront être adaptées aux voies ouvertes par la 6G, comme la téléprésence. Enfin, des développements devront être faits du côté des capteurs industriels (vision, toucher, son, capteurs sensoriels et capteurs environnementaux et de charge mentale, capteurs ambiants et fusion de données multi-capteurs).



d. AXE4 – IA de Confiance, IA embarquée

Enjeux : L'intelligence artificielle est au cœur de la transformation de notre quotidien, dans tous les domaines jusqu'aux systèmes critiques ou en milieux extrêmes. Son déploiement nécessite d'assurer la qualité, la sûreté et la sécurité des services rendus de façon à établir la confiance des utilisateurs et à minimiser l'impact énergétique et écologique. La génération d'un algorithme d'IA se fait habituellement dans le cloud car cela nécessite beaucoup

de données et de puissance de calcul. Une fois l'algorithme développé, deux voies sont possibles : soit conserver les données dans le cloud (c'est les approches américaines et chinoises), soit respecter la propriété de la donnée en la laissant localement là où elle se crée et transférer alors l'algorithme d'IA vers l'objet connecté local qui devient alors un objet connecté et intelligent (approche plutôt européenne et française). Cette approche d'IA Embarquée est en phase d'accélération car elle permet d'éviter le coût de transfert et traitement au cloud en embarquant l'IA au plus près des usages. Elle se double d'un travail d'explicabilité et de sûreté de décision de cette IA Embarquée qui doit nécessairement être aussi une IA de Confiance. Au niveau national et européen le CEA contribue à un programme « IA de confiance, IA embarquée » visant à construire des solutions (méthodes, outils, technologies) en rupture, opérationnelles et souveraines pour le développement responsable de l'IA au service de la science, la société et l'industrie. Les objectifs à poursuivre comprennent :

- L'explicabilité des algorithmes;
- La démonstration de leur fiabilité;
- La mise au point d'outils permettant un large déploiement des solutions d'IA dans tout le tissu industriel;
- La mise au point de processeurs dédiés à faible consommation, autorisant l'apprentissage local;
- L'intégration du calcul (cf Axe 1) neuromorphiques et Spike;
- La conception de neuronal processeur unit avec des architectures hybrides intégrant des niveaux calcul, des réseaux de neurones et des matrices de capteurs.

Du point de vue économique, l'enjeu concerne à la fois la compétitivité de toutes les filières industrielles et l'amélioration de l'instrumentation scientifique, par l'emploi de solutions IA efficaces et la captation de nouveaux marchés (solutions matérielles et logicielles d'AI embarquée), qui font l'objet d'une compétition internationale pour les prochaines années. Cette approche de l'IA faisait partie du premier plan national IA issu du rapport Villani (2018) et fera l'objet d'un second plan IA Embarquée dans le cadre des plans de relance (2022). C'est un axe important pour le CEA

Forces du CEA : La force majeure du CEA est la pluridisciplinarité de ses équipes de recherche, dans lesquelles les experts des différents domaines scientifiques et technologiques sont reconnus. C'est un atout considérable dans le domaine de l'intelligence artificielle, car les ruptures majeures à venir seront obtenues à la croisée de différentes disciplines comme mathématiques & algorithmie, sciences de la vie & physique statistique ou systèmes embarqués & ingénierie logicielle & technologie matérielle avancée. Sans oublier les expertises métier nécessaires au développement d'applications différenciantes (robotique, fabrication additive et plus généralement l'industrie 4.0, la mobilité intelligente dans son ensemble, IoT (Intelligence of Things), analyse et production de contenus, cybersécurité, et matériaux, physique nucléaire, technologies et système pour la santé, l'énergie et l'environnement...). Le CEA a su anticiper l'émergence de ces enjeux en initiant dès 2018 la mise en place d'inflexions positives sur les deux volets : confiance et embarqué. L'ensemble de l'activité du CEA dans ce domaine sera nécessairement couplé à un volet de transfert industriel déjà très actif avec des PME et les grands groupes français (STMicroelectronics, Soitec, Valeo, Dolphin, THALES, Yuman, TechnipFMC, Bureau Veritas, Safran, Atos, Renault, Total, Siemens, DocteGestio, Arcure, Diota, Diabeloop...). Le CEA bénéficie d'une capacité remarquable à capitaliser la recherche sur des plates-formes, méthodes, outils et instruments dédiés aux métiers et à trouver et inventer les technologies ciblées pour porter ces développements dans des puces ultra-basse consommation. Enfin, la vision du CEA relaie les stratégies nationales et européennes de positionnement d'une IA performante et de confiance pour la société et

l'industrie (livre blanc de la commission européenne, manifeste des industriels pour l'IA...) qui souligne **la nécessité pour l'Europe d'imposer une identité et une éthique dans le développement et l'usage de l'IA sur l'ensemble de la chaîne (des données à l'exploitation en assurant protection, sûreté et auditabilité)**. Cette vision se met déjà en place à travers les actions clés dont le CEA est une partie prenante, particulièrement active, comme les grands défis, les plans de relance, les instituts de recherche dédiés (3IA MIAI, DATAIA) et les actions du programme DIGITAL (installations d'essai et d'expérimentation « TEF », plates-formes d'IA à la demande et réseaux de dissémination de l'IA « DIH »). Enfin, ce nouveau domaine sera probablement générateur de startups compte tenu de l'avance des développements et des preuves de concept par rapport aux marchés.

Axes de recherches proposés : Afin de contribuer à relever ces défis, le CEA s'investit en fonction de ses compétences distinctives. Les solutions matérielles et logicielles qu'il développe se retrouvent dans tous les domaines où la qualité et la performance de l'IA sont critiques. Cela concerne aussi bien le traitement de grandes masses de données, l'analyse de contenu, la supervision intégrée de systèmes complexes (infrastructures, grands équipements), la robotique que des traitements localisés au sein de composants embarqués. Cette R&D contribue à atteindre l'objectif pressant d'une indépendance technologique (matérielle, logicielle, outils) nationale et européenne pour un numérique raisonné au service de la science, la société et l'industrie. Pour le CEA, les enjeux de la confiance et de l'embarqué doivent être relevés en s'appuyant sur trois axes principaux de recherche et de développement :

- Algorithmes, des données aux technologies, pour la frugalité et la confiance par construction;
- Formalisation, incertitude et qualification pour la caractérisation des performances et de la confiance;
- Architectures de circuits;
- Composants et technologies combinant la performance et la sobriété en embarqué.

Ces quatre axes intègrent et développent les programmes associés aux inflexions « IA de confiance » et « IA embarquée » déjà initiées et s'appuient sur le programme « Incertitude » de la DES.

Des actions exploratoires à fort potentiel seront nécessaires, en exploitant les outils déjà existants au niveau CEA (PTC, Focus, inflexions...) ainsi que les modalités nouvelles proposées par la mission. A titre d'exemple :

- **La découverte constructiviste des modèles de classification et de décision machine :** l'apprentissage est vu comme un ensemble de transformations successives et explicables de modèles déjà structurés, plutôt que comme l'envoi à l'aveugle de données influant, par leur masse et leurs corrélations, la structuration d'un modèle initialement exempt d'information. Cette approche pourrait par construction amener les éléments de formalisation et d'argumentation pour assurer la confiance, mais également, de par sa démarche économe en donnée et calcul, fournir des réponses de frugalité globale facilitant le déploiement dans l'embarqué. Elle a donc un impact positif potentiel sur les 3 axes de recherche et développement identifiés.
- **L'exploitation de la physique aux limites de l'électronique pour le calcul :** il s'agit de rapprocher les fonctions mathématiques de haut niveau exploitées pour la convergence de l'apprentissage (et issues initialement de cadres de la simulation physique) et les phénomènes de physique électronique bas niveau vus comme des opportunités plus

que comme des perturbateurs ou limites de l'électronique classique. A titre d'exemple, on commence à utiliser des propriétés physiques des matériaux pour réaliser du calcul dans la mémoire, au lieu de se limiter à du simple stockage de valeurs binaires. Un accent particulier sera à porter sur les stratégies d'intégration forte de technologies hétérogènes. Ces approches ont par essence un impact sur l'ensemble du cycle des algorithmes jusqu'aux technologies ; elles demanderont à être déclinées sur les 3 axes principaux.

- Un projet avec Valeo d'un circuit d'IA Embarquée en architecture 3D avec une topologie hybride de réseau de neurone pour démontrer la portabilité d'un algorithme d'apprentissage profond destiné à l'automobile intelligente ;
- Un projet de puce neuromorphique utilisant les algorithmes d'IA incrémental (spike) à base de mémoire non-volatiles à très basse consommation. Cette démonstration fera l'état de l'art mondial ;
- Un projet de reconnaissance de gestion devant l'écran par les technologies apprenantes.

Recommandations de mise en œuvre : Un atout majeur du CEA est la richesse de son expertise et sa multidisciplinarité qui permet d'associer compétences IA et compétences métiers des différents domaines clés pour aborder l'enjeu de la confiance et de l'embarqué. De plus, les plateformes logicielles du CEA-List et les technologies du CEA-Leti sont très complémentaires et parfaitement alignées pour avancer rapidement. Il serait donc contre-productif de vouloir globalement regrouper toutes les compétences IA en un unique pôle. Cependant il est nécessaire de bénéficier pleinement de la masse critique, en coordonnant et capitalisant l'ensemble des activités. Cela relève d'une logique de coordination programme et de pilotage opérationnel. Elle pourrait étendre plus largement et poursuivre dans la durée les dynamiques initiées par les deux inflexions « IA de confiance » et « IA embarquée », et l'action « Incertitude ». C'est le sens des propositions de la section 6c notamment.

Dans ce domaine, le CEA s'investit en fonction de ses compétences distinctives. Les solutions matérielles et logicielles qu'il développe se retrouvent dans tous les domaines où la qualité et la performance de l'IA sont critiques. Pour le CEA, les enjeux de la confiance et de l'embarqué doivent être relevés en s'appuyant sur quatre axes principaux de recherche et de développement : Algorithmes, des données aux technologies, pour la frugalité et la confiance par construction ; Formalisation, incertitude et qualification pour la caractérisation des performances et de la confiance ; Architectures de circuits ; Composants et technologies combinant la performance et la sobriété en embarqué.



e. AXE5 – Cybersécurité

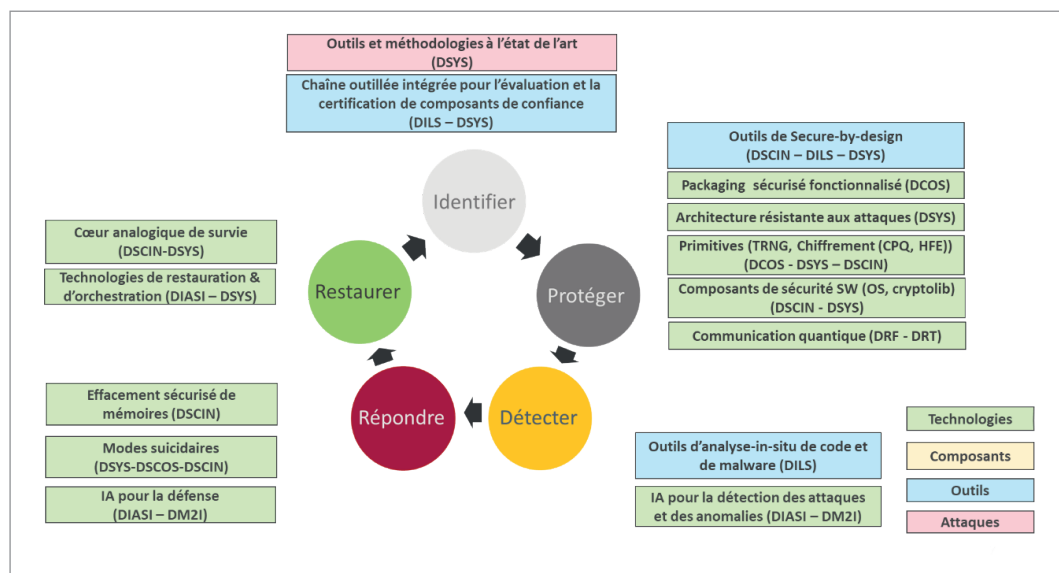
Enjeux : Les systèmes numériques font face à des cybermenaces en constant développement et à des attaquants de mieux en mieux armés, disposant de plus en plus de moyens. Les objets industriels connectés (l'interconnexion massive d'équipements et d'objets connectés augmente d'autant la vulnérabilité de ces infrastructures), les infrastructures critiques (qui permettent de produire les biens et d'assurer les services essentiels à la nation), et les nouveaux services numériques qui assurent le fonctionnement et la résilience de notre société (logistique, le commerce en ligne ou le vote électronique...) font partie des cibles privilégiées. S'ils ne sont pas bien pensés, déployés et maîtrisés, ces systèmes numériques peuvent donc devenir une menace pour les Etat, les citoyens, les organisations, en facilitant les actions de déstabilisation, d'espionnage, de prise de contrôle, de désinformation, voire de destruction. La cybersécurité est donc un enjeu essentiel de la transition numérique et elle est devenue une préoccupation centrale pour garantir la souveraineté et la croissance numérique de l'Europe. Le CEA est aussi concerné par le sujet en tant qu'exploitant de ses propres systèmes d'information (SI) et opérant ses propres systèmes industriels (ICS). Le CEA est un acteur de confiance dans l'écosystème national, mais il a la possibilité de jouer un rôle plus important en devenant l'acteur de référence sur des sujets bien ciblés.

Forces du CEA : En cybersécurité, le CEA a construit une expertise opérationnelle et il conduit des actions de recherche technologique depuis plus de 20 ans, sur l'ensemble de la chaîne de valeur — de la microélectronique jusqu'aux applications en passant par des actions d'intégrations de solutions. Il a la capacité de combiner les volets matériel et logiciel pour traduire les résultats d'une recherche d'excellence en nouvelles technologies numériques et outils pour l'industrie, ainsi que la maîtrise de la cybersécurité opérationnelle pour ses propres besoins. En lien avec l'ANSSI et la DGA, le CEA peut contribuer aux moyens techniques des services de l'Etat et de l'industrie pour assurer leur cyber protection. Les activités du CEA sont aussi en ligne avec les Priorités de l'Europe avec des volets clairement identifiés dans les programme Horizon Europe et Digital Europe. A travers son implication dans ECSO le CEA contribue fortement à la structuration des GT Certification, Sectoral Demand, et Strategic Research and Innovation Agenda, en co-éditant en particulier les propositions de programme de travail H2020 pour la période 2021-2025. Le CEA est aussi très actif dans plusieurs associations dont l'European Organisation for Security (EOS) et EARTO.

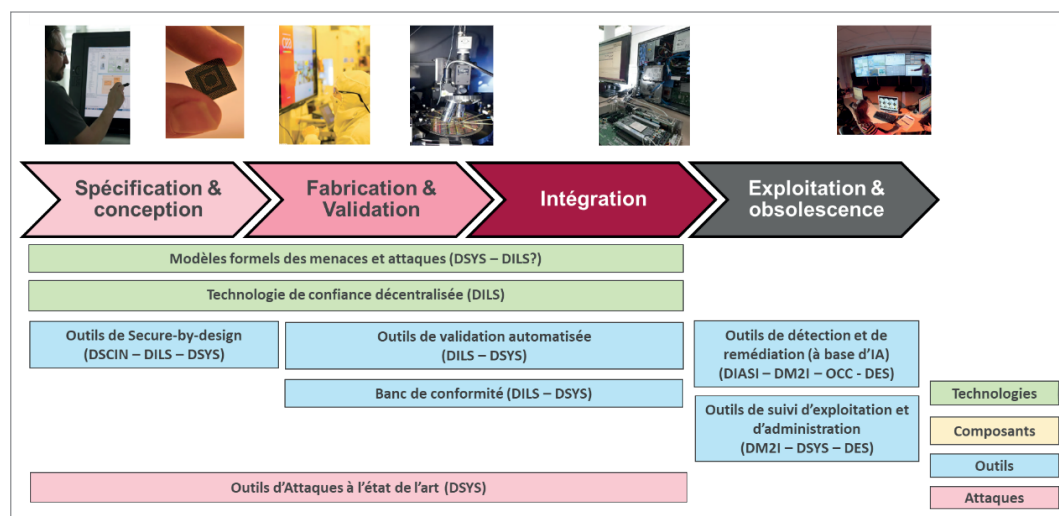
Axes de recherches proposés : La sécurisation des secteurs critiques nécessite des composants de confiance, conçus pour être plus résistants et résilients, et de nouveaux outils qui augmentent la compétence en cybersécurité de leurs utilisateurs (pour leur permettre d'acquérir la capacité de « cybercentaures ») qui constituent une ressource encore rare. Ces nouveaux outils permettraient d'automatiser et de fiabiliser les actions de conception, de validation et de maintien en condition de sécurité des systèmes critiques et infrastructures sensibles. L'ambition du CEA est de devenir un centre de compétence à visibilité mondiale en technologies et outils pour sécuriser les composants clés des industries de sécurité et de la défense (IA, connectivité, calcul massif) :

- Primitives de sécurité et briques technologiques (logiciel/matériel) ;
- Outils d'analyse de la sécurité.

Cette ambition impose d'être capable d'apporter des solutions aux enjeux de résistance des systèmes critiques : défaillances (sûreté), malveillances (sécurité), effondrements et chocs (résilience), en abordant le composant comme une « infrastructure critique » devant être capable de se défendre et de s'adapter constamment aux nouvelles situations. La figure suivante illustre l'approche prévue.



L'évolution des menaces et la recrudescence des attaques nécessitent des outils adaptés durant tout le cycle de vie de l'objet (conception, exploitation, MCS) comme indiqué ci-dessous.



Recommandations de mise en œuvre : Les activités d'intégration pour la cybersécurité mobilisent des compétences transverses nombreuses au CEA (en particulier, microélectronique, numérique), essentielles pour répondre aux besoins des industriels. La stratégie du CEA en cybersécurité s'est matérialisée par la création d'une maille en 2019 ; elle est coordonnée par le programme transversal Sécurité Globale du CEA. Nous recommandons de capitaliser sur ces deux initiatives qui fonctionnent efficacement. Le CEA pourrait également engager des coopérations au niveau européen afin de massifier et apprendre sur ses compétences. Enfin, le CEA pourrait lancer un projet de carte bancaire de haute sécurité capable d'intégrer les meilleures expertises de sûreté et de sécurité à date. Cette carte pourrait être un démonstrateur pour les usages internes ou externe du CEA.

La sécurisation des secteurs critiques nécessite des composants de confiance, conçus pour être plus résistants et résilients, et de nouveaux outils qui augmentent la compétence en cybersécurité de leurs utilisateurs. Ces nouveaux outils permettraient d'automatiser et de fiabiliser les actions de conception, de validation et de maintien en condition de sécurité des systèmes critiques et infrastructures sensibles. L'ambition du CEA est de devenir un centre de compétence à visibilité mondiale en technologies et outils pour sécuriser les composants clés des industries de sécurité et de la défense (IA, connectivité, calcul massif).



f. AXE6 – Usine et installation du futur

Enjeux : La transformation numérique bouleverse l'industrie manufacturière. De la robotique à la réalité virtuelle ou augmentée, en passant par le traitement des données de production, tous les systèmes adoptent peu à peu les nouvelles technologies du numérique pour faire face à des enjeux majeurs : gagner en agilité et en flexibilité (capacité à se reconfigurer à différents produits pour faire face aux petites et moyennes séries), améliorer la qualité et la traçabilité des produits. Les technologies numériques permettent la supervision fine de l'outil de production dans son ensemble, la (re)configuration rapide des moyens de production, leur robotisation ainsi que la collecte et le traitement des données. Elles s'appliquent à l'exploitation de grands systèmes industriels, tout comme de grandes installations scientifiques. Les enjeux de l'usine et de l'installation du futur sont particulièrement en phase avec les défis français actuels de souveraineté et de réindustrialisation.

Forces du CEA : Le CEA maîtrise les technologies clés, sur lesquelles repose(ro)nt les usines et installations du futur, par ses travaux pour le manufacturing avancé, et son historique dans le nucléaire. Ses différents laboratoires réunissent un large spectre de connaissances et de compétences très complémentaires : robotique, vision, capteurs, IoT, IA, codes numériques, génie logiciel, ingénierie système, simulation, etc. L'offre du CEA couvre les différents domaines applicatifs des usines du futur : automobile, aéronautique, naval, énergie, où l'écosystème industriel français est très riche (des PME aux Grands Groupes, end-users). Le CEA est aussi son premier client pour ses besoins propres, il déploie en interne ses technologies avec un retour immédiat sur l'efficacité de ses activités (exemples de jumeaux numériques d'installations à démanteler à la DES ou de caméras pour l'imagerie médicale). Les travaux portant sur les autres thèmes du numérique (cybersécurité, intelligence artificielle, perception, matériaux, ...) apportent aussi des éléments indispensables aux composants de l'usine du futur et renforcent considérablement les atouts du CEA dans ce domaine.

Axes de recherches proposés : Le CEA développe des solutions comprenant des composants matériels et logiciels destinés au domaine de l'usine et des installations du futur, depuis la robotique autonome et la robotique collaborative, jusqu'aux jumeaux numériques et à l'optimisation en temps réel de l'outil de production. Le CEA est positionné sur les trois technologies clefs du numérique qui viendront assister l'homme, qui restera au centre de l'usine et de l'installation du futur :

1. **La robotique**, avec deux objectifs particuliers (i) la programmation intuitive pour rendre le robot de plus en plus autonome et (ii) la manipulation ou préhension intelligente pour apporter une plus grande flexibilité à l'usage des robots interactifs et apprenants, permettant ainsi des adaptations locales ou la reconfiguration de la production. Pour atteindre ces objectifs, il faudra lever les verrous existants sur chacun des trois piliers de la robotique : le pilier « *Sense* » (perception de l'environnement pour la localisation et la compréhension du contexte), le pilier « *Think* » (contrôle commande et IA pour la programmation intuitive) et le pilier « *Act* » (actionneurs assurant dextérité et manipulation/préhension intelligente). Les travaux se déclineront ainsi :

- a. **IA pour la perception** : il s'agira d'améliorer la robustesse de l'IA pour la vision, qui a connu ces dernières années des résultats remarquables, et d'en élargir l'usage par un enrichissement sémantique et fonctionnel (stratégies de prises, fonctionnalisation des outillages...).
- b. **Prise de décision en fonction du contexte** : il y a aujourd'hui peu de partage d'intelligence entre les robots et leur environnement, d'où l'intérêt d'intégrer des outils de prise de décision en fonction du contexte, qui peuvent automatiquement reprogrammer une ligne de production en fonction de pannes et des disponibilités des agents, humains ou robots. La gestion des risques de sûreté en ligne devra également être une composante de la prise de décision.
- c. **Programmation intuitive** : la programmation constitue un verrou à la diffusion plus large de la robotique. L'enjeu majeur est ainsi de ne plus avoir à « programmer le robot », mais de lui montrer une tâche que sa compréhension et son autonomie vont lui permettre de réaliser. Ce système robotisé devient alors accessible au néophyte tout en valorisant le rôle de l'opérateur : on lève ainsi le verrou du coût de la programmation des robots, un frein important pour les entreprises.
- d. **Manipulation/préhension intelligente** : la préhension est une fonction robotique essentielle. La manipulation agile nécessite de lever des verrous sur la vitesse d'exécution, l'amélioration de la dextérité ainsi que la robustesse de fonctionnement. L'aspect financier est également très important.

2. **Le jumeau numérique** permettant à l'homme d'interagir avec l'ensemble du système de production et de garder le contrôle des installations. Les recherches du CEA répondent à une vision holistique s'efforçant de dépasser les fonctionnements cloisonnés actuels (notamment des différentes étapes du cycle de vie : conception, mise en service, fonctionnement, évolution...). Une attention particulière sera portée au jumeau carbone pour l'estimation de l'empreinte carbone. Les travaux adressent les 6 verrous suivants :

- a. **Données et interopérabilité** : le défi réside dans la collecte massive et distribuée de données fiables, sécurisées, sémantisées, et structurées pour élaborer les modèles du jumeau numérique. Cette collecte s'appuiera sur des capteurs et une infrastructure de communication sans fil performante, intelligente et efficace d'un point de vue énergétique. La normalisation et la mise en place d'une continuité numérique sont stratégiques.
- b. **Représentativité** : la simulation numérique constitue le socle du jumeau. Le besoin d'une fidélité accrue dans les résultats de la simulation nécessite des moyens de calculs adaptés : puissance brute de calcul (HPC), ou selon le besoin, en embarqué, mais aussi via l'intégration multi-physique et multi-échelles. Un défi important sera le recours aux algorithmes d'IA, en substitut et/ou complément aux approches usuelles de modélisation et de résolution numérique (notamment pour des phénomènes physiques trop complexes à modéliser).

- c. **Cycle de vie** : il s'agit de dé-siloter les fonctionnements actuels en offrant un jumeau numérique vivant tout au long du cycle de vie de l'entité étudiée, couplant produit et process. Ceci permet de constituer une vision globale et donc de prendre des décisions plus adaptées en ayant la main sur des paramètres initialement disjoints. Ceci permet également de capitaliser sur toutes les étapes de la vie du produit ou de l'installation pour ensuite utiliser ces informations afin d'améliorer le processus de production.
- d. **Conduite du changement** : l'utilisation croissante du jumeau numérique implique la migration d'anciens systèmes (par ex. la possibilité de connecter un dispositif existant à de l'IOT), mais aussi d'anciennes pratiques (par ex. le changement des modes de formation des opérateurs avec l'utilisation de dispositifs en réalité étendue).
- e. **Capitalisation et gestion de la connaissance** : les outils de mise au point du jumeau numérique doivent devenir plus intuitifs, en passant d'une logique essentiellement descriptive à une logique d'aide à la structuration des idées et des connaissances, et d'aide à la résolution des problèmes de production.
- f. **Problématique énergétique et carbone** : il s'agit de fournir des outils de mesure, de modélisation et de simulation permettant de construire le jumeau carbone pour calculer l'empreinte carbone d'un produit.

3. La fabrication additive qui permettra de gagner en reproductibilité et de tendre de plus en plus vers le zéro défaut :

- a. Le monitoring en ligne de la fabrication (des centaines d'informations recueillies pour chaque pièce fabriquée) pour s'assurer de la qualité des pièces, détecter d'éventuels artefacts, mettre en place des stratégies correctives en temps réel afin d'atteindre les objectifs de qualité et de mieux comprendre le procédé pour le faire progresser.
- b. Le déploiement de stratégies de qualification des procédés inspirées de l'aéronautique et du médical, secteurs industriels les plus avancés sur ces nouvelles techniques de fabrication.
- c. L'automatisation des étapes, incluant le post-traitement des pièces (dépoudrage, polissage, finition) pour aboutir aux pièces finales sans étape limitante et de manière reproductible.
- d. Le chaînage numérique des outils numériques de conception, de simulation du procédé de fabrication et de l'usage, afin de pouvoir anticiper dès la conception les contraintes de fabrication sur la pièce finale (dimensions, propriétés mécaniques, thermiques des matériaux, fonctionnalités), de valider virtuellement l'usage et de réaliser des itérations rapides jusqu'au produit final.

Recommandations de mise en œuvre : Le numérique pour l'usine du futur intègre des technologies très variées comme l'IA, la cybersécurité ou la robotique, qui sont maîtrisées par des équipes différentes. L'animation de la transversalité sera fondamentale pour innover à la fois sur les briques et sur leur intégration dans les systèmes. Cette animation devra intégrer des projets internes à TRL faible afin d'alimenter les ruptures. Le développement des technologies clés de l'usine du futur nécessitera également d'améliorer l'interopérabilité entre les entités numériques (couplage des codes de simulation, communication entre outils numériques...) et entre les entités hardware (protocoles d'échanges entre robots...). Les initiatives de normalisation visant l'interopérabilité devront être soutenues.

Le CEA développe des solutions comprenant des composants matériels et logiciels destinés au domaine de l'usine et des installations du futur, depuis la robotique autonome et la robotique collaborative, jusqu'aux jumeaux numériques et à l'optimisation en temps réel de l'outil de production. Le CEA est positionné sur les trois technologies clefs du numérique qui viendront assister l'homme, lequel restera au centre de l'usine et de l'installation du futur : la cobotique, le jumeau numérique, et la fabrication additive.



g. AXE7 – Numérique au service de la transition énergétique

Enjeux : Tandis que les défis environnementaux structurent déjà le secteur automobile, l'aéronautique est fortement incitée à devenir plus vertueuse. Parallèlement, la transition énergétique impose d'intégrer davantage d'énergies renouvelables intermittentes aux réseaux, et d'assurer une meilleure gestion de l'énergie à tous les niveaux. Le numérique peut fournir des outils précieux pour gérer la complexité liée, d'une part, au passage d'un système énergétique centralisé à un système distribué intermittent et, d'autre part, au foisonnement des productions et des consommations d'énergie. Cette optimisation passe par une bonne connaissance de l'état courant des systèmes à piloter mais également de leur état futur pour disposer de capacités d'anticipation et ainsi optimiser le pilotage. Le diagnostic et le pronostic des composants énergétiques à piloter sont donc deux caractéristiques majeures à maîtriser pour en assurer le pilotage optimal. Dans le domaine du diagnostic, du pronostic et du pilotage, qu'il soit bas niveau, haut niveau, centralisé ou distribué, des progrès sont attendus au niveau des capteurs, de leur intégration, de l'électronique de traitement (coût, consommation, performance, sécurité) ainsi qu'au niveau de la modélisation et des traitements embarqué en temps réel. Les composants pour la mobilité électrique et la conversion des ENR font aussi l'objet de recherches intenses en raison des améliorations de rendement qu'ils promettent, avec un impact majeur sur l'économie de ces systèmes. C'est donc à tous les niveaux de la chaîne que le numérique est attendu : composant, architecture du système de conversion, système de gestion intelligent de type BMS ou EMS pour les batteries, pile à combustible, champ solaire, jusqu'au système de supervision et de contrôle du réseau local. L'industrie française dispose de capacités remarquables tant pour la production des composants (SOITEC, ST) que des systèmes électriques (Schneider, Valeo, Actia, Hager, Socomec...).

Forces du CEA : Le CEA est le premier acteur français de la recherche sur les énergies décarbonées, le nucléaire, l'hydrogène, la batterie, le solaire, les réseaux de chaleur, la mobilité électrique. Pour développer des stratégies de gestion et de contrôle, il s'appuie sur ses plateformes d'expérimentation sur les réseaux, les composants de l'énergie (PV, stockage, H2, chaleur, bâtiments...) et le numérique. Le CEA travaille depuis une quinzaine d'années dans le domaine de l'électronique de puissance, en partenariat avec ST Microelectronics pour les composants. Ainsi a été construite une filière intégrée du matériau au convertisseur autour du GaN sur silicium. Le CEA est également très actif dans l'électronique pour l'énergie et en particulier les électroniques de gestion des batteries Li-ion et des piles à combustible (Battery Management System BMS et Fuel Cells Management System). Le BMS embarque systématiquement du calcul numérique afin de traiter les signaux issus des différents capteurs qui permettent une gestion optimale de ces composants via la prédiction de tendances de vieillissement, de durée de vie et de gestion sous contraintes de limitation du vieillissement. Le CEA possède aussi une expertise, un savoir-faire et une expérience en modélisation, simulation numérique,

calcul haute performance et approche multi-échelles, mise en œuvre de technologies liées aux bâtiments, aux réseaux électriques, thermiques, au stockage électrochimique et hydrogène, à la mobilité décarbonnée et à l'efficacité énergétique. Il entretient des partenariats avec plusieurs ETI et PME françaises du domaine.

Axes de recherches proposés : la proposition se focalise sur 3 enjeux :

- « Les composants énergétiques augmentés par le numérique — faire plus et plus longtemps » ;
- « Les réseaux augmentés par le numérique — faire autant autrement » ;
- « Un numérique sobre au service de l'efficacité énergétique — faire plus avec moins de matière et d'énergie ».

La feuille de route scientifique et technologique s'articule autour de 5 piliers :

- **Les briques énergétiques « augmentées »** : l'ambition est d'aller au-delà du « composant ». En couplage fort avec les programmes de la DPE issus notamment de la mission Energie et portant sur la simulation et la modélisation des systèmes énergétiques, il s'agit ici d'appliquer des algorithmes basés données et basés modèles pour le diagnostic, le pronostic et le pilotage des briques. Les travaux portent sur : la réduction de modèles pour le temps réel qui va s'imposer de plus en plus dans les systèmes énergétiques, l'évolution vers des briques plus communicantes avec une exigence de sécurisation du système de communication, l'intégration de nouveaux capteurs spécifiques auxquels seront associés des traitements sobres et efficaces.
- **L'électronique de puissance et de pilotage des moteurs électriques** : la quête indispensable d'une « Green Electronics » impose des convertisseurs de puissance à très haut rendement, de forte densité de puissance et présentant une flexibilité accrue grâce au pilotage numérique. Les semi-conducteurs grand gap ont un rôle essentiel dans cette rupture avec la montée en maturité du GaN et du SiC. Les travaux du CEA visent à diminuer drastiquement les pertes dans les convertisseurs par l'atteinte d'une maturité technologique des composants et à rendre ces technologies abordables, compétitives sur le plan économique par rapport au silicium. De nombreuses collaborations industrielles sont déjà à l'œuvre (STMicroelectronics, Soitec...). On s'attachera également à explorer d'autres ruptures, plus lointaines, avec le diamant comme semi-conducteur de puissance.
- **L'intégration des convertisseurs** : l'objectif est de multiplier par 10 la densité des convertisseurs à horizon 10 ans grâce à une fréquence de fonctionnement très élevée qui permet la réduction de la taille des composants passifs et un contrôle commande en rupture pour le pilotage des convertisseurs grand gap. Les nouvelles architectures avec mutualisation du hardware permises par les lois de contrôle numérique plus sophistiquées seront au service des réseaux énergétiques et de la mobilité électrique. Enfin, nous développerons un jumeau numérique du convertisseur, du composant au système.
- **Les architectures modulaires et multi-niveaux pour le stockage et la conversion d'énergie pour les réseaux multi-vecteurs** : il s'agit de développer des standards de convertisseurs haute performance pour des architectures modulaires et multi-applicatives. Cela nécessite la mise en œuvre d'un contrôle optimal et du hardware adapté. Nous ferons la démonstration du couplage entre la conversion d'énergie et les systèmes de stockage

et démontrerons les bénéfices associés : rentabilité, flexibilité, disponibilités, sécurité, haut rendement et fiabilité augmentée des systèmes.

- **Les réseaux énergétiques intelligents** : notre action s'articule autour des 3 vecteurs : renforcer, innover, déployer. Il va s'agir de rendre interopérables et de faire évoluer les outils existants (incluant des outils de l'état de l'art), de mutualiser des fonctions génériques telles que le traitement des incertitudes ou les méthodes d'optimisation et enfin de valoriser ces outils à travers un usage interne et externe auprès de partenaires industriels et institutionnels. A plus long terme un axe de recherche portera sur les méthodes numériques avancées destinées à amplifier les approches d'optimisation et de pilotage, à investiguer de nouvelles voies en rupture de modélisation et de conception de réseaux d'énergie par la criticalité auto-organisée. Enfin le déploiement implique l'intégration de solutions logicielles et matérielles en création, transfert, traitement et protection de données.

Recommandations de mise en œuvre : le CEA souhaite développer une chaîne complète d'outils numériques pour la conception, l'intégration et le test basés sur les normes de la filière (IEC 61850, IEC 62443, IEC 62351...). Les contraintes d'interopérabilité et de cyber-sécurité doivent être intégrées dès la conception et maîtrisées tout au long du cycle de vie des systèmes (IT et OT), notamment dans les réseaux qui occupent une place centrale. La chaîne de valeur nécessite une forte coordination : par exemple les équipes qui conçoivent et réalisent les convertisseurs de puissance doivent s'aligner avec les technologies des composants et les besoins des réseaux. Des plateformes d'intégration et de test utilisant ces outils seront développées en collaboration avec les industriels dans une logique de pré-certification des produits. Ainsi le bon développement de cet axe sera favorisé par les mesures préconisées pour améliorer la transversalité (Section 6).

La proposition s'articule autour de 3 enjeux : les composants énergétiques augmentés par le numérique (faire plus et plus longtemps) ; les réseaux augmentés par le numérique (faire autant autrement) ; un numérique sobre au service de l'efficacité énergétique (faire plus avec moins de matière et d'énergie).

La feuille de route scientifique et technologique s'articule autour de 5 piliers : les briques énergétiques « augmentées » ; l'électronique de puissance et de pilotage des moteurs électriques ; l'intégration des convertisseurs ; les architectures modulaires et multi-niveaux pour le stockage et la conversion d'énergie pour les réseaux multi-vecteurs ; les réseaux énergétiques intelligents.



h. AXE8 – Numérique frugal et durable

Enjeux : L'impact environnemental du numérique est de plus en plus important : il pourrait représenter entre 20 et 30 % de la consommation totale d'électricité d'ici 10 ans. De plus, il utilise une quantité grandissante de matériaux rares, polluants et complexes à recycler. Un changement de paradigme est nécessaire, afin d'intégrer la frugalité comme une performance à atteindre au même titre que les autres : rapidité, puissance de calcul, miniaturisation, résolution, etc. Elle se décline suivant trois axes interdépendants : la recherche technologique,

l'implication dans les normes, labels et méthodes du développement durable, et enfin l'axe sociétal en lien avec les usages et le monde économique.

La consommation se répartit entre fabrication des équipements (environ 30 % de l'énergie) et exploitation. Celle-ci se divise, en termes de consommation d'électricité, en : utilisateurs (44 %), réseau (32 %), centres informatiques (24 %). Parmi les principaux équipements consommateurs on trouve, dans l'ordre décroissant : les ordinateurs, les télévisions, les smartphones, les objets connectés. Les écrans et les processeurs sont les composants énergivores. Le volume consommé va évoluer avec le nombre d'équipements (les prévisions affichent par exemple un doublement pour les TV, et un palier pour les smartphones).

Concernant les traitements, le cloud est nettement plus coûteux en énergie que le traitement local. Il supporte les surconsommations liées à la télécommunication et aux centres de calcul. La première voie de la frugalité énergétique consiste donc à développer les traitements locaux et limiter les transferts de données brutes. Le calcul embarqué est au cœur de cette tendance.

Du point de vue technologique, actuellement l'exigence de frugalité est peu perceptible dans le marché : le « *low power* » est essentiellement tiré par les contraintes d'autonomie des objets nomades. Les processeurs puissants, basés sur les nœuds les plus avancés, ont des consommations élevées (plusieurs centaines de W). L'optimisation des composants de la microélectronique par opération de calcul (donc par fonction) a conduit à une diminution de l'énergie consommée de 14 ordres de grandeur en 80 ans d'histoire du calcul et (environ) 8 ordres de grandeur dans l'histoire de la microélectronique. Le basculement vers la frugalité appelle un nouvel effort sur les priorités de recherche au bénéfice de la recherche de ruptures franches, visant à gagner encore plusieurs décades plutôt que quelques pourcents.

S'agissant des matériaux, la masse des équipements numériques devrait passer de 128 Mt en 2010 à plus de 300 Mt en 2025, à la faveur notamment de l'explosion du nombre d'objets connectés et de l'informatique embarquée. La tension se manifeste en particulier dans le domaine des terres rares. L'enjeu est ici la substitution des matériaux i) considérés comme polluants ii) coûteux ou en voie de raréfaction. L'analyse du cycle de vie va devenir progressivement indispensable pour chaque action de R&D liée

Forces du CEA : Le CEA est présent sur l'ensemble de la chaîne du numérique : des matériaux, aux composants, aux systèmes et logiciels, avec une culture des systèmes robustes et efficaces (spatial, automobile, cybersécurité). Il a les capacités et les compétences pour développer des visions et des solutions globales. Cette position se trouve renforcée par les demandes des partenaires industriels du CEA qui font entrer la sobriété dans leurs roadmaps, avec des démarches globales de mesure et réduction d'impact ou l'objectif de neutralité Carbone. Sur le volet technologique, le CEA est à l'état de l'art dans plusieurs thèmes clés pour la frugalité : la conception des transistors et des mémoires, les architectures dédiées à l'IA, les composants télécom, les architectures de calcul intensif, etc. Sur le volet des dispositifs, des matériaux, de la simulation et des concepts le CEA dispose aussi d'une forte assise avec ses équipes de recherche fondamentale notamment en spintronique, photonique ou en physique théorique notamment sur la résolution des problèmes quantiques.

Axes de recherches proposés : Ils visent la fabrication des composants du numérique (analyse de cycle de vie, économie de matériaux critiques, matériaux de substitution, réparabilité...) et de leur usage (architectures et composants basse consommation, architecture des réseaux de données et utilisation de réseaux distribués...). L'action du CEA pour un numérique plus sobre peut se décliner suivant trois axes fortement interdépendants :

- La recherche scientifique et technologique en vue de diminuer la consommation globale d'énergie et de matériaux critiques ou polluants liés au numérique. Une démarche d'« écoconception » est nécessaire pour intensifier l'optimisation énergétique des composants et des systèmes. Des ruptures sont aussi nécessaires pour réduire massivement la consommation d'énergie à la fois au niveau des briques élémentaires telles les transistors ou les mémoires, au niveau de l'architecture des puces avec éventuellement de nouveaux paradigmes comme le calcul dans la mémoire ou l'analogique, au niveau algorithmique et du génie logiciel et au niveau système à la fois *hardware* et *software*.
- L'implication dans les normes, labels et méthodes du développement durable, il s'agit de définir une échelle mesurant sobriété et frugalité d'une solution ainsi que son impact environnemental.
- L'axe sociétal en lien avec les usages et le monde économique. Etudier notamment l'impact de la réglementation sur l'empreinte environnementale du numérique dans les trois « domaines » : économique, politique et sociétal

Recommandations de mise en œuvre : Tous les autres axes proposés par la mission peuvent et vont devoir contribuer à la « sobriété numérique » (économie de matière, d'énergie, de data). Une animation spécifique de la communauté en ce sens sera nécessaire. Il s'agit de faire de la frugalité un vecteur d'innovation affiché par le CEA. L'importance de ce virage impose une réflexion spécifique qui dépasse le cadre de la mission. Nous proposons notamment de travailler à une forme de label applicable à une part large de nos travaux, de développer des règles et moyens d'évaluation de la qualité de nos technologies au regard des critères de cycle de vie, d'envisager de mettre en place des petites équipes dédiées à des travaux exploratoires à ambition de forte rupture dans ce domaine, d'avoir une approche spécifique sur la question des recommandations ou règles d'utilisation.

Les axes de recherche proposés visent la fabrication des composants du numérique (analyse de cycle de vie, économie de matériaux critiques, matériaux de substitution, réparabilité...) et de leur usage (architectures et composants basse consommation, architecture des réseaux de données et utilisation de réseaux distribués...). L'action du CEA pour un numérique plus sobre peut se décliner suivant trois axes fortement interdépendants : la diminution de la consommation globale d'énergie et de matériaux critiques ou polluants liés au numérique ; l'implication dans les normes, labels et méthodes du développement durable ; l'axe sociétal en lien avec les usages et le monde économique.



6. DES MODES DE FONCTIONNEMENT ADAPTÉS AUX EXIGENCES DU NUMÉRIQUE

Résumé

La Mission Numérique propose de prolonger la mission de son comité de pilotage pour assurer, pour le compte de la Direction Générale, le suivi dans la durée des actions proposées et la coordination des acteurs mobilisés, en lien avec les autres dispositifs de pilotage en place (DFP, HPC, inflexions, etc.).

Les actions suggérées par la Mission Numérique visent à fédérer et mobiliser une communauté d'expertise :

- animation *bottom up* d'une communauté de pratiques ;
- appui sur la structuration en mailles des programmes ;
- plateformes mutualisées au niveau de l'organisme pour le génie logiciel, la conception numérique de matériaux, le traitement de données scientifiques massives ;
- moonshots ;
- recherche *blue sky* ;

Enfin, la mission numérique propose plusieurs pistes pour attirer et retenir les talents dans le domaine du numérique, le CEA devant faire face à une situation concurrentielle forte.

Un fonctionnement plus agile et plus transversal est recommandé par tous les participants aux groupes de travail de la mission numérique pour développer les axes proposés, notamment pour des raisons techniques évoquées plusieurs fois dans l'exposé.

Au-delà du numérique, de manière générale, les personnes les plus innovantes sont réputées s'appuyer sur 5 compétences (**Le gène de l'innovateur** — C. CHRISTENSEN) :

- L'association (création de combinaisons inédites) ;
- Le questionnement (remise en cause de ce qui existe) ;
- L'observation ;
- Le réseautage (test des idées à travers un réseau) ;
- L'expérimentation.

Et 3 facteurs sont reconnus comme indispensables pour stimuler l'innovation (**Cohendet et al (2003), Mc Dermott et O'Dell (2001) et Créplet (2001)**) :

- établir une confiance partagée entre participants ;
- partager des buts communs ;
- avoir une passion commune.

Les entreprises les plus innovantes appliquent ces principes et favorisent donc la transversalité de différentes manières :

- Une innovation est d'autant plus forte qu'elle résulte de la **combinaison originale de connaissances hétérogènes** détenues par des **organisations distinctes** (*Bart Nooteboom*)
- « **Equilibre entre les compétences de découverte (questionnement, expérimentation...)** et **les compétences d'exécution (analyse, planification, mise en œuvre)** pour avoir la capacité de générer des idées neuves ET de les exécuter » (*Le gène de l'innovateur — C. CHRISTENSEN*)
- « Plus l'innovation envisagée est de type radical, plus l'équipe chargée du projet doit bénéficier **d'autonomie par rapport aux fonctions traditionnelles et à la hiérarchie** » (*Le gène de l'innovateur — C. CHRISTENSEN*)

S'inspirant des travaux des GT et de ces quelques éléments de littérature, ce chapitre propose d'explorer plusieurs modalités de fonctionnement complémentaires, destinées à permettre un fonctionnement plus transversal. Elles nous paraissent indissociables de l'ambition affichée dans les axes. Le savoir-faire du CEA en mode projet nous laisse penser que ses équipes sont à même de s'adapter assez naturellement à ces modalités.

NB : nous en avons écarté d'autres :

- Des modifications d'organigramme pour regrouper les équipes : en effet les combinaisons de compétence varient au fil du temps et des projets : il ne serait pas raisonnable de recomposer perpétuellement l'organigramme
- S'agissant de la gouvernance, la création ou la désignation d'une entité à la DG ou au sein d'une DO qui aurait seule la responsabilité du pilotage. Nous faisons le pari que la mobilisation constatée au sein de la mission se prolongera mieux en restant dans le mode collectif adopté jusque-là.



a. Propositions pour la gouvernance des actions suggérées

La première action de la mission numérique fut de constituer son comité de pilotage, qui a conduit la réflexion, l'animation et le pilotage des phases qui ont jalonné cette année de travail suivant un mode de travail collectif où les décisions sont prises par consensus. Ce comité est bien représentatif de l'ensemble des compétences numériques au CEA. Les participants ont été assidus, avec jusqu'à une réunion de 2h par semaine. Chacun d'eux a apporté une contribution substantielle à la production de la mission. L'un des grands avantages présentés par ce comité est de pouvoir identifier rapidement les possibilités et les contraintes de chaque DO dans le domaine et de faciliter le choix de solutions acceptables et pertinentes pour toutes les DO.

Les membres du comité suggèrent que la meilleure option pour assurer dans la durée le suivi des actions proposées et la bonne coordination de l'ensemble des acteurs mobilisés, serait de prolonger la mission du comité, en coordination avec les autres dispositifs de pilotage en place (DFP pour les mailles, HPC, inflexions, etc.). Ce choix est une façon de responsabiliser les DO vis-à-vis du succès des axes du numérique, dans un mode où toutes sont concernées directement, et de les mettre en situation de devoir se coordonner en permanence, avec un canal efficace.

Ce comité sera également une force de proposition vis-à-vis de la DG tant pour l'organisation des activités inter-DO que la cohérence générale des actions relevant du numérique. Il rapportera à celle-ci sur l'ensemble de sa mission, avec une périodicité à définir.

Le comité de coordination ainsi pérennisé resterait copiloté DRT/DRF et composé des représentants des quatre DO ainsi que quelques experts, un représentant du cab AG et un représentant de la DFP. Il invite en tant que de besoin, des représentants des directions fonctionnelles : DRI/DAE pour les actions Europe, DIR Valo pour le benchmark, DSI pour les outils logiciels, DCOM pour la communication autour du numérique.

Les membres ne mésestiment pas le temps qui sera absorbé par les tâches du comité de coordination. Néanmoins les enjeux numériques sont suffisamment importants et au cœur de leurs responsabilités pour justifier cette mobilisation.

Si sa pérennisation est retenue, les rôles de ce comité pourront être de plusieurs natures :

Coordination des positionnements externes :

- Coordination de positionnement opérationnel sur des programmes nationaux ou européens;
- Coordination de la réflexion sur des opportunités de valorisation ou de partenariats externes structurants;
- Coordination des propositions à la DG relatives au positionnement du CEA vis-à-vis des stratégies nationales;
- Contenus des actions de communication;
- Lien avec le *comité d'éthique sur le numérique*.

Suivi des actions :

- Proposer pour arbitrage à la DG des actions transverse de type *Moonshot* et *blue sky* en fonction de son cadrage, puis effectuer la mise en place et le suivi opérationnel des actions décidées par la DG : évaluer les états d'avancement des

projets, se coordonner entre DO pour leur bon avancement et remonter la direction générale et en particulier DFP les questions hors du périmètre d'action des DO (modification des objectifs, go/nogo);

- Organiser annuellement un séminaire des acteurs du numérique, à la fois mobilisant les acteurs internes et comportant une partie de mise en visibilité externe.

Suivi des communautés et plateformes (PF) :

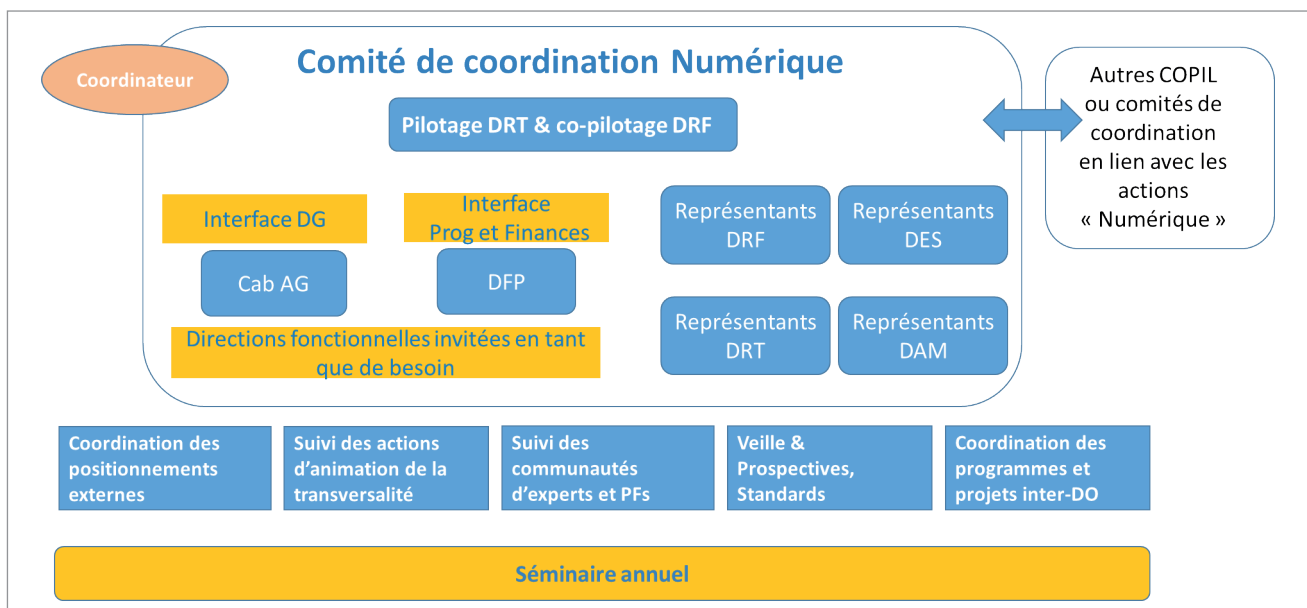
- Assurer un suivi des communautés d'experts afin de vérifier le maintien de la dynamique et intervenir en tant que de besoin. Il s'agit d'une animation **bottom up** assurée par des volontaires, le comité n'intervient pas directement dans son fonctionnement;
- Faciliter la mise en place et suivre les trois PF communes proposées par la mission numérique et mettre en visibilité pour la communauté les PF existantes. Analyser les moyens demandés, être l'interface de la DG pour l'instruction, suivre la mise en œuvre, assurer ensuite le suivi dans la durée.

Veille & Prospectives, Standards :

- Assurer un rôle de veille et d'analyse prospective des évolutions du domaine (prolongement de la mission initiale) afin de permettre au CEA d'être à même de rester un acteur central du numérique;
- Assurer la prise en compte dans le développement de la stratégie des enjeux liés aux standards et à la normalisation, assurer une visibilité des licences stratégiques.

Coordination inter-DO :

- Ce comité pourra être un interlocuteur « de synthèse » pour les programmes et projets du périmètre numérique. Ainsi une première action de ce comité sera dans la droite ligne des travaux menés, de proposer à la DFP une évolution des mailles numériques cohérente avec ce rapport (voir ci-après 6.c);
- D'un point de vue opérationnel ce comité veillera aussi la cohérence des travaux menés dans les différents cadres (inflexions, PEPR, *Moonshot*, FOCUS...) au soutien de DFP et la DG.



b. Coordination des programmes et projets transversaux et articulation avec la structuration en mailles du CEA

Liens avec la structuration des programmes en mailles transverse

Les mailles et la nomenclature associée sont l'outil de consolidation de la stratégie programmatique et financière au CEA. Elles servent de référence pour la construction du PMLT et la présentation des exercices budgétaires annuels. Un bilan de l'activité du CEA ainsi qu'une projection des activités sont réalisés et présentés entre les équipes et vers la hiérarchie chaque année. Construites sur les enjeux des grandes missions du CEA, la quasi-totalité des 13 mailles sont transverses et regroupent les activités des équipes de l'ensemble des DO travaillant sur un même enjeu. La transition numérique se décline aujourd'hui en trois mailles : la microélectronique, les systèmes numériques et la cybersécurité. Cette organisation animée par la DFP est ainsi l'outil privilégié pour synchroniser les évolutions programmatiques en transversalité au sein du CEA. Dans le cadre de ces exercices, le comité de coordination numérique contribuera à renforcer sur le plan opérationnel la transversalité et la cohérence des travaux menés dans chaque DO.

Adaptation de la structure des mailles

Il sera nécessaire, une fois les conclusions de la mission numérique débattues, d'analyser et proposer les évolutions des périmètres des mailles nécessaires aux objectifs de suivi de la direction générale afin d'en favoriser la lisibilité, et harmoniser les périmètres des mailles.

Le comité de coordination devra proposer à la DFP les évolutions préconisées afin de pouvoir les intégrer en 2022. L'objectif *in fine* sera de mettre en cohérence les axes forts et actions retenus, avec la structuration en mailles/axes utilisée par DFP. Les participants à la MN ont souligné très largement leur souhait de prendre la structuration en mailles ainsi mise à jour comme référence de l'ensemble de la gestion des programmes dans les DO et les instituts afin de simplifier le suivi et le reporting.

Un premier exercice a été mené mettant en perspective la déclinaison des Enjeux de la MN par rapport aux mailles/axes existants du PMLT (cf. Annexe III). Il s'avère que ces enjeux sont couverts en grande partie par les mailles de la transition numérique.

Une coordination inter-DO pour travailler au succès des projets

Les directions opérationnelles ont la responsabilité dans leur périmètre d'action de la bonne exécution des programmes. Pour les programmes impliquant plusieurs DO, le comité de coordination fournira un espace permanent et bien rodé pour le suivi des projets inter-DO structurants, pour traiter les inévitables difficultés, saisir de nouvelles opportunités, définir des actions pour s'adapter à la réalité des projets. Le mode projet/jalons, déjà expérimenté avec succès pour certaines inflexions, sera la norme de fonctionnement du comité.

Un reporting consolidé en inter-DO

Le suivi des projets fait en commun facilitera la production des bilans d'activités et d'indicateurs globaux, ainsi que la préparation des revues de mailles organisées par la direction générale. Cela contribuera à la lisibilité et à la visibilité interne et externe du CEA, à la dissémination et au transfert des résultats.



c. Animation *bottom up* de la communauté du numérique au CEA

Enjeux

La mission numérique a permis de rassembler plus de 200 experts dans les différents domaines du numérique. Mais au total, le CEA regroupe plus de 3000 chercheurs, ingénieurs et techniciens répartis au sein des directions opérationnelles et œuvrant dans les différents domaines de la recherche et du développement en sciences du numérique. Une animation transverse permanente de ces compétences permettrait de répondre à 4 objectifs principaux :

- Identifier et mobiliser les experts pour accélérer la montée en compétences collective des équipes en partageant les connaissances sur le long terme.
- Favoriser la création et générer des projets innovants grâce aux synergies entre experts et faire émerger de manière plus performante des propositions de rupture en réponse à des problématiques techniques grâce à une intelligence et une capacité d'initiative collective.
- Mobiliser rapidement des experts pour répondre collectivement de façon documentée à des demandes d'expertise ou de conseil, notamment auprès de nos tutelles.
- Renforcer l'attractivité du CEA vis-à-vis de nouveaux talents, en développant les liens existants avec les partenaires extérieurs notamment de la formation continue et des réseaux professionnels.

Pour y parvenir, il est nécessaire de décloisonner les échanges et de favoriser l'adhésion d'un maximum de salariés concernés à une approche participative afin, in fine, de faire vivre une communauté active.

Cette communauté contribuera à mettre à niveau le CEA vis-à-vis des méthodes de stimulation de l'innovation déployées par les entreprises les plus dynamiques du numérique en France ou à l'étranger et de startups réputées plus agiles et rapides. Construire un socle solide et commun à cette communauté améliorera la performance globale de nos programmes dans le domaine du numérique en permettant de cristalliser la « masse critique » des compétences du CEA dans ce domaine par un fonctionnement en réseau en circuit court.

Les propositions qui suivent ont été élaborées par le groupe de travail constitué de jeunes chercheurs en numérique au CEA.

Benchmark

Les principes développés ci-dessous s'appuient sur l'exemple de communautés de pratique ayant obtenu des résultats significatifs. On peut notamment citer les communautés des logiciels open source (e.g. GNU/Linux, Mozilla Firefox, Python, PHP...) ou les communautés des réseaux sociaux de partage de vidéos. Quelques centres de recherche partenaires (DTI, IMEC, VICOMTECH, AIMEN) ont aussi été consultés pour comprendre leurs mécanismes internes de soutien à la mise en place de projets collaboratifs, la plupart disposant en effet d'équipes transverses en charge de mettre en place des stratégies communes pour être en phase avec leurs tutelles et les instances européennes.

Plusieurs études^{18 19} en Science Humaine et Sociale abordent également ce sujet. Certaines développent notamment le concept de capital social d'une entreprise. Alors que le capital humain fait généralement référence à la capacité individuelle, le capital social fait référence aux capacités collectives dérivées des réseaux. Selon ces études, plus le niveau de capital social est élevé, plus les communautés (distribuées) sont incitées à se connecter et partager les connaissances.

On retrouve notamment dans ces communautés les caractéristiques de l'ouverture de la connaissance, de la transparence des travaux et des décisions, d'un fonctionnement mérito-cratique et d'une diversité des compétences souvent accompagné d'échanges informels et conviviaux ainsi que de confiance et bienveillance entre les membres.

Cette analyse s'est également appuyée sur un benchmark mené en 2020 auprès de 25 entreprises, écoles et associations françaises qui ont déployé un Réseau Social d'Entreprise (RSE) pour animer des communautés d'experts, de métiers, de projets ou de pratique. Celui-ci a permis de recueillir le retour d'expérience de déploiement et d'usages de RSE et de mesurer l'impact en termes d'apports pour ces communautés.

Principes de fonctionnement d'une communauté de pratique au CEA

Pour susciter l'adhésion, une communauté de pratique devra permettre une prise de contact rapide entre ses différents membres (connectivité), un accès simple et ouvert à l'information (transparence) et un partage des informations facilité (brassage des idées). Elle s'appuiera sur une équipe d'animation et un leadership garant de règles et des valeurs partagées (modération). Sa participation s'appuiera sur la base du volontariat et le temps qui y sera consacré devra être reconnu par le CEA.

La création d'une communauté induit également des risques auxquels il faudra faire face, comme celui du repli sur soi, sur ses connaissances, sur ses succès passés, en manquant d'ouverture aux nouvelles idées et approches. On peut également citer les difficultés pour maintenir une cohésion et un engagement de ses membres, l'absence de leadership, le micro-management qui peut être un frein à la participation et à l'engagement, l'instrumentalisation qui peut être un frein à la participation et à l'engagement, l'instrumentalisation par l'organisation qui peut conduire à un appauvrissement des échanges, la faiblesse des interactions et du partage, voire la concurrence entre ses membres.

Pour soutenir le fonctionnement et l'animation de cette communauté, il est nécessaire de s'appuyer également sur un socle d'outils logiciels performant. Un certain nombre d'outils existent déjà au CEA pour soutenir la transversalité des actions. Toutefois bon nombre d'entre eux ne sont pas interconnectés ce qui rend difficile la recherche rapide et efficace d'informations. Dans le cadre de la Mission Numérique, Talkspirit a été testé. Ce réseau social d'entreprise (RSE) est une des solutions possibles : c'est celle qui est préconisée à ce stade.

Première consultation des experts

L'engagement des différents acteurs CEA dans la création et l'animation d'une communauté numérique n'étant rendu possible que par une approche participative, une première consultation (*) a été réalisée pour collecter les avis des experts numériques et partager avec eux les modalités associées à la mise en œuvre de cette communauté. Il en ressort les principaux éléments suivants :

¹⁸ : IT to support knowledge sharing in communities, towards a social capital analysis, journal of information technology, February 2006, Marleen Huysman et al.

¹⁹ : Knowledge sharing on enterprise social media: practices to cope with institutional complexity, Nick Oostervink, journal of computer-mediated communications 21, 2016 156-176

- Plus de **80 %** d'entre eux sont intéressés à participer à une communauté de pratique dans leur domaine de compétence ;
- Il est recherché avant tout la possibilité d'améliorer la capacité de collaboration et d'information ;
- **80 %** de ceux qui seraient intéressés sont prêts à y consacrer au moins 5 % de leur temps ;
- Parmi ceux qui connaissent Talkspirit, **78 %** considèrent que cette plateforme répondrait complètement ou en complément d'autres outils au besoin d'animation de cette communauté ;
- **64 %** pensent qu'une ouverture vers l'extérieur du CEA de cette communauté est nécessaire.

Ce sondage a permis également d'avoir une première estimation quant aux rôles de chacun vis-à-vis de cette communauté et l'appétence associée. Notamment, **34 %** de ceux qui se considèrent intéressés par la démarche se positionnent comme futurs contributeurs de contenus et **21 %** d'entre eux comme animateur ou coordinateur du réseau.

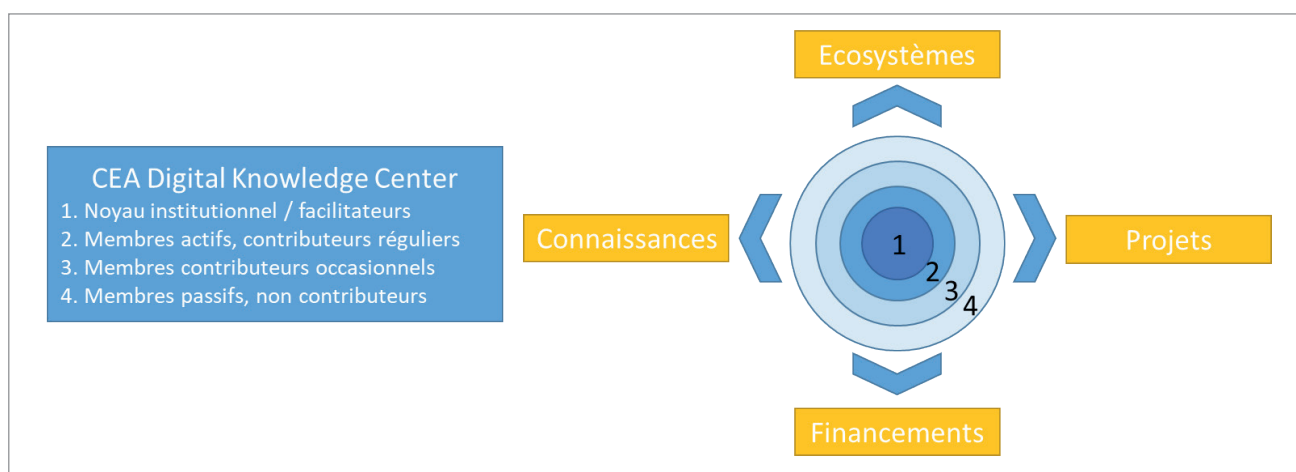
() Consultation réalisée en 2021 auprès des 240 experts ayant participé à la Mission Numérique avec un taux de participation de 38 % représentant l'ensemble des Directions Opérationnelles.*

Préconisations

Compte tenu de ces enjeux, de ces principes et de ces premiers résultats, les préconisations suivantes sont formulées pour construire et animer de manière pérenne la future communauté des experts du numérique au CEA :

- **Préconisation #1** : Employer la dénomination de communauté de « pratique » des sciences du numérique en considérant l'ensemble des acteurs de ces multiples communautés pour être inclusif (soit en allant au-delà du périmètre strict de la mission).
- **Préconisation #2** : Adopter une démarche participative de co-construction de la communauté pour obtenir l'adhésion d'une majorité de contributeurs. Le sondage auprès de la communauté de la Mission Numérique en est le premier exemple à poursuivre afin de recueillir les besoins, avis et visions des futurs membres de cette communauté.
- **Préconisation #3** : Bâtir les fondations de la communauté sur les besoins de ses membres et non sur des outils préalablement identifiés.
- **Préconisation #4** : Choisir des outils caractérisés par leur facilité d'utilisation avec pour objectif d'obtenir une adhésion rapide d'un grand nombre d'utilisateurs.
- **Préconisation #5** : Identifier les communautés de pratiques clés (pas nécessairement les mêmes que les groupes de travail créés au cours de la Mission Numérique).
- **Préconisation #6** : Identifier les facilitateurs, le noyau de l'animation de la communauté ainsi que les personnes motivées, convaincues de l'intérêt de la transversalité, pour assurer un amorçage réussi.
- **Préconisation #7** : Définir les indicateurs pour mesurer le retour sur investissement et communiquer vers les membres sur la valeur apportée par la communauté pour eux-mêmes et pour le CEA.

- **Préconisation #9** : Garantir aux membres de la communauté que le CEA et donc leur hiérarchie directe leur accorde le temps nécessaire pour contribuer à la transversalité et le valorise.
- **Préconisation #10** : Proposer une structure de la communauté de pratique à l'image du centre de connaissances créé par la Commission Européenne sous l'égide du JRC (Joint Research Center), apportant différents « services » aux membres (accéder rapidement aux connaissances, renforcer les écosystèmes, rechercher des financements, mettre en place des projets...).



Afin de répondre aux besoins de transversalité exprimés, la mission numérique recommande de créer des « communautés transversales d'experts » sur les axes forts préconisés par la mission et animées par leurs membres. En s'inspirant d'actions déjà déployées par des entreprises et des études en SHS sur le sujet, elle préconise 10 actions pour commencer à activer et faire vivre ces communautés, suivant des principes fondateurs : volonté de susciter l'adhésion par une démarche participative en rendant facile l'interaction, de garder une certaine transparence de l'information et une capacité de brassage d'idées efficace.



d. Animation de plateformes mutualisées : génie logiciel, matériaux, données

Les trois activités d'ingénierie système (incluant la gestion de la connaissance), d'ingénierie logicielle et de traitement des données ont des modes communs :

- Différents domaines de recherche au CEA (voire une majorité) vont fortement en dépendre. Pour le dire simplement, ceux qui réussiront dans des domaines comme les batteries, le jumeau numérique pour l'énergie, la microélectronique, la santé numérique, etc. seront aussi ceux qui auront développé ces outils numériques au meilleur niveau ;

- Ils vont devenir des marqueurs d'excellence des organismes;
- Ils répondent à des besoins homogènes de nombreux laboratoires, un peu partout au CEA;
- Ils mobilisent des compétences assez pointues, très convoitées en général.

A partir de ces constats, les GT ont proposé une approche commune à ces trois sujets : il s'agit de mettre en place des plateformes collaboratives mutualisées à l'échelle de l'organisme, sur le modèle de ce qui a été fait avec succès par exemple pour la caractérisation avec la PFNC à Grenoble.

Partage de développement logiciel : la plateforme *DeepLab*

Il existe aujourd'hui un cadre commun pour l'hébergement des projets de développement logiciel au CEA basé sur l'outil open-source français Tuleap mais sa portée et ses fonctionnalités demeurent trop limitées. Par ailleurs, au-delà de l'infrastructure informatique, l'objectif sera de fournir à la communauté des développeurs des outils d'homogénéisation, de meilleures connaissances mutuelles et de partage, et ainsi concourir à l'amélioration de la qualité et de la vitesse de développement. Cette plateforme servira de support à l'animation d'un écosystème CEA des développeurs de systèmes numériques complexes. Nous proposons de l'appeler CEA-DeepLab. Elle sera capable d'interopérer avec les grandes plateformes ouvertes que des équipes du CEA utilisent déjà mais développera également pour ses besoins propres des services partagés dont les plus avancés feront usage de l'IA dans le domaine de l'aide au développement de systèmes numériques : une déclinaison interne de la forge Tuleap, technologie open-source française, et donc souveraine, pourra servir de point de départ au développement de la plateforme avec un mode de gouvernance inter-DO à définir. L'expression de besoin ainsi qu'une première liste des projets ayant vocation à être hébergés sont en cours d'établissement afin de pouvoir rapidement lancer l'instruction du projet si la DG le retient. Un volet fondamental concerne la recherche et la mise en œuvre de solutions permettant l'ouverture de cette infrastructure de recherche au monde extérieur, Open-DeepLab, et son utilisation simple et conforme aux paradigmes ergonomiques modernes tout en demeurant compatibles avec la PSSI du CEA.

Cette plateforme sera multidisciplinaire et pourra intégrer également des bibliothèques HPC, des briques de logiciels, des méthodes numériques et des algorithmes de base partagés, l'ensemble visant à optimiser l'efficacité des différentes chaînes de calcul mises en œuvre au CEA. Les « intergiciels » prennent aussi de plus en plus d'importance au fur et à mesure que la complexité des machines s'accroît. Il s'agit des couches logicielles d'abstraction indispensables pour que les applications puissent tirer parti des machines massivement parallèles. Compte-tenu des architectures des futurs supercalculateurs, très hétérogènes et modulaires, cette compétence est essentielle au sein d'une plateforme partagée telle que *DeepLab*.

Gestion des données avec les outils et les compétences associées en science de la donnée

La gestion des données pour les besoins scientifiques internes du CEA et leur mutualisation passent également par la standardisation, l'interopérabilité et le partage des outils numériques, que ce soit pour la production et le stockage des données expérimentales, ou pour la manipulation et l'analyse, en particulier dans une problématique de données massives. Des outils méthodologiques dédiés (fouille de données, apprentissage automatique supervisé et non supervisé, intelligence artificielle...) nécessitent l'acquisition de compétences propres en science de la donnée.

La capitalisation des données est un point tout spécialement important. Par exemple, le CEA est pourvoyeur de très nombreuses données de comportement des matériaux, la possibilité d'utiliser ces données par l'accessibilité des outils numériques rend plus que jamais nécessaire une capitalisation générique de ces données. La compatibilité des formats et l'adoption de méthodologies génériques rendront leur utilisation envisageable à grande échelle. Au-delà des outils, une meilleure utilisation des bases de données passera aussi par la constitution d'un catalogue partagé des données disponibles et en particulier de leur documentation (problématique associée à la gestion de la connaissance en général). Ce croisement et cette accessibilité sont nécessaires pour permettre une fertilisation croisée des différentes thématiques du domaine des matériaux en particulier les travaux aux différentes échelles et le couplage. L'ensemble devra être accessible via un portail unique et simple d'utilisation favorisant la création d'environnements de travail partagés, collaboratifs, sécurisés et performants. Cette plateforme d'exploitation des « données scientifique du CEA » offrirait en outre des services d'intelligence artificielle, de visualisation des données... tout en respectant les règles de cybersécurité et de confidentialité. Ces services seraient accessibles à tous les laboratoires du CEA, qui sinon seraient amenés à se doter chacun d'une expertise propre. La PFNC a montré que la mutualisation permet de se doter de moyens de qualité très supérieure et d'accélérer énormément l'identification des solutions de traitement en profitant de la richesse d'une communauté au sein de laquelle on trouve très souvent un collègue qui a déjà traité un problème similaire. La plateforme de traitement de données serait d'ailleurs un prolongement très naturel de la PFNC, au vu de l'explosion du volume de données générées par ces moyens de caractérisation.

On peut envisager à partir de là une politique de développement de Meta Data Management en lien avec les initiatives comme EOSC (*European Open Science Cloud*), notamment pour une meilleure visibilité et une valorisation des bases de données CEA. Une gouvernance de la donnée au niveau CEA, en lien avec la politique nationale sur le sujet, devra aussi être organisée. Enfin, ces initiatives de partage doivent permettre de structurer une communauté de chercheurs travaillant en sciences des données qui sont actuellement dispersés dans les différents départements et instituts.

Mutualisation des actions et des outils métiers dans le domaine des matériaux

Le numérique pour les matériaux est un cas d'usage emblématique pouvant s'appuyer sur la plateforme *DeepLab* pour le développement et l'exploitation des bases de données interoperables. La thématique des matériaux est tout spécialement concernée par ces évolutions compte tenu de la variété des approches, du patrimoine important de données disponibles et de la nécessité d'accompagner les approches multi-échelles qui deviennent d'un intérêt croissant en lien avec la fonctionnalisation des futurs matériaux (structures architecturées, gradients de compositions, évolution des méthodologies de conception et fabrication). La conception des matériaux et la simulation des procédés sont des enjeux transverses à toutes les directions opérationnelles qui, pour leurs besoins propres, ont développé des méthodologies, des outils numériques et des connaissances partageables. L'objectif final est la constitution d'un jumeau numérique du matériau ou du procédé de fabrication, pouvant entrer dans une boucle de rétroaction (optimisation fonctionnelle d'un matériau, analyse en temps réel du procédé...). Les premiers jumeaux numériques proposés concernent le calcul de la conduction thermique, les électrodes de batterie et la fabrication additive. A cet égard le programme focus pour les batteries avec ses 15 thèses, et son pilotage scientifique inter DO a déjà montré le pouvoir d'accélération d'une approche structurée de la simulation matériaux, qui tire évidemment partie du savoir-faire du CEA dans ce type d'approche (Thermo-hydraulique, neutronique, microélectronique, armes).

Dans le prolongement de l'action Focus, une approche capable de mobiliser les effectifs des DO sur des objectifs communs pour les principales feuilles de route matériaux, utilisant des briques de simulation communes, est fortement recommandée par la mission.

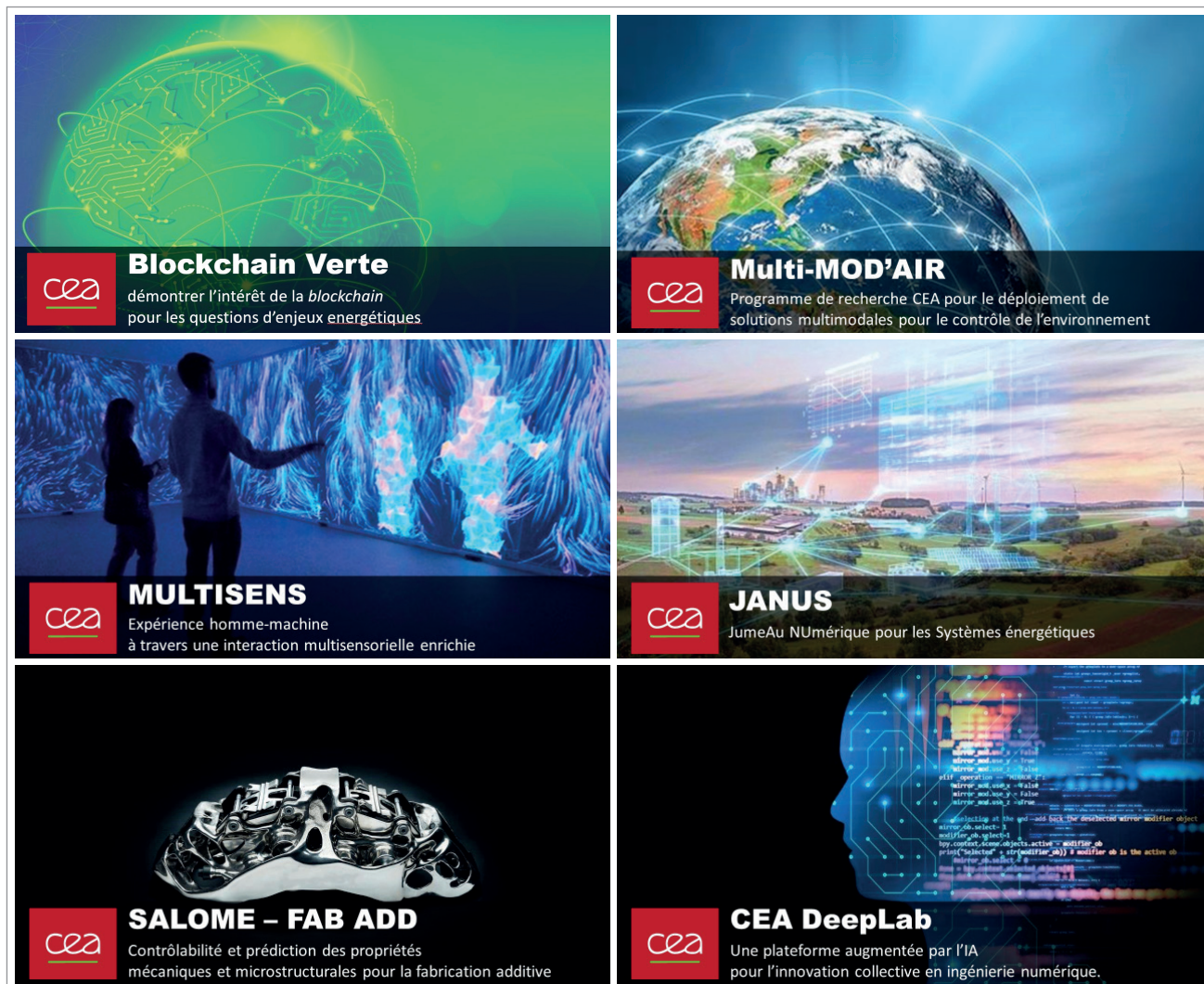
La mission numérique préconise la création de plateformes collaboratives mutualisées à l'échelle de l'organisme. Les activités de Génie Logiciel, Data for Sciences et Numérique pour les matériaux répondent d'abord aux besoins internes de nombreuses activités de recherche du CEA, mais peuvent devenir un marqueur différenciant. Elles mobilisent des compétences pointues et convoitées, des investissements récurrents. La MN propose de les mutualiser pour atteindre plus facilement l'excellence.



e. Des projets vitrines pour mobiliser en interne et en externe : les « Moonshots »

Le concept de « *moonshots* » inspiré de grandes universités comme le MIT ou l'EPFL a tout de suite été approprié par les GT et suscité un fort engouement. Un « *moonshot* » est défini comme un démonstrateur disruptif et fédérateur qui répond à un enjeu sociétal ou industriel fort. Ainsi, un tel projet doit pouvoir servir de vitrine aux technologies du CEA, contribuer à animer la communauté interne, voire externe du numérique, mais aussi pouvoir être *in fine* valorisé soit dans des projets institutionnels ou industriels. Répondant à des enjeux sociétaux ou industriels, ces *moonshots* doivent être accessibles à un public non spécialiste. Pratiquement, un *moonshot* doit être un projet réalisable en 18 à 36 mois, avec des challenges scientifiques et techniques et des résultats matérialisés par une maquette, un démonstrateur, un système opérationnel, une expérience. Le résultat n'est pas forcément un objet, il peut être un jalon ambitieux pour un concept de rupture. Chaque groupe de travail a proposé 1 ou 2 *moonshots* engageant des moyens de l'ordre de 10 à 30 h.an/an et 0 à 2 M€ de dépenses hors MO. Un *moonshot* peut impliquer plusieurs groupes de travail, et souvent plusieurs DO du CEA.

Au total 21 *moonshots* ont été proposés. Quelques exemples apparaissent dans la figure suivante. L'intégralité des 21 *Moonshots* figure dans l'annexe E2



Proposition d'un modèle de fonctionnement

Constatant cet engouement, le comité de pilotage a réfléchi à une manière de mettre en œuvre ces projets. L'expérience passée réussie des plans de couplage l'a inspirée, ainsi qu'une littérature abondante sur les fondements d'une organisation projet agile et transverse.

Les **plans de couplage** initiés au CEA en 2012 étaient destinés à renforcer le continuum entre recherche amont et recherche appliquée sur des sujets stratégiques, en maximisant d'une part le potentiel de ressourcement et d'autre part le vivier de compétences. Ces plans de couplage permettaient à la DRT de préparer l'avenir en renouvelant ses offres et à la DSM, puis à la DSV, de valoriser leur socle scientifique. Le but commun poursuivi était la pérennisation d'un apport de technologies différentiantes aux industriels. Les projets phares étaient identifiés sur une base top-down, aucun appel à projets n'était émis en interne. Les directeurs de DO avec le soutien des directions scientifiques se sont coordonnés pour faire émerger des projets en phase avec la stratégie de chacun sur 3 thématiques : l'énergie, la nanoélectronique et les matériaux avancés. Au-delà du volet scientifique et technologique, des moyens spécifiques ont été dédiés :

- Sur le plan des ressources humaines, ont été mis en place des mécanismes d'accompagnement pour favoriser les échanges sur le terrain en abaissant les barrières culturelles et en favorisant les mobilités internes si nécessaires;

- Sur le plan des moyens, une plateforme Nano permettant l'exploration, l'incubation et la validation des preuves de concept ainsi qu'un accès privilégié aux grands instruments, plateformes et moyens expérimentaux pour résoudre les problèmes technologiques a été décidé.

Au final, près d'une quinzaine de projets transverses a été menée sur 3 à 5 ans. Ces projets étaient jalonnés de milestones permettant de faire le point sur les avancées par rapport à la concurrence internationale et de redimensionner les projets si besoin. Ils étaient tous suivis par la hiérarchie jusqu'au plus haut niveau (comités de pilotage transverses DO et suivi spécifique par l'AG). Les équipes projets étaient mixtes rassemblant une vingtaine de personnes (chercheurs aguerris, mais aussi post-doc et thésards). Un budget de 2 millions d'euros/an était consacré à ces projets. Il couvrait plusieurs postes de dépenses (N10, N20, N30, N60, N90), la prise en compte de la N10 étant notamment un facteur déclenchant.

Un retour d'expérience a permis de mettre en lumière les formes d'organisation qui ont permis d'obtenir des résultats remarquables :

- Même lieu géographique;
- Transversalité des équipes permettant une complémentarité des compétences;
- Existence d'un lien historique entre les équipes.

Les bénéfices évoqués par les participants à ces projets plans de couplage ont été nombreux : accroissement des connaissances scientifiques, accès à de nouveaux moyens, émergence de nouvelles idées, élargissement de la vision et élargissement du réseau.

Nous proposons que l'organisation pour les projets *moonshots* s'inspire des plans de couplage, en retenant 3 éléments essentiels pour la réussite de ces projets :

- **Une organisation agile, réduite et éphémère** via un mode de fonctionnement en laboratoire virtuel délocalisé permettant à des équipes de se former de manière temporaire sans se détacher toutefois de leurs unités de rattachement
- **Une facilité d'accès à de nouveaux moyens** via le partage d'équipements ou via la mise à disposition d'accès privilégié à de grands instruments ou à des plateformes communes (PFNC, salles blanches...)
- **Un suivi jalonné à haut niveau**, transversalement aux DO avec une périodicité trimestrielle par exemple, voire au niveau de l'administrateur général avec une périodicité annuelle.

Un appel à projets interne devrait permettre de lancer entre 2 et 3 « *Moonshots* » par an, pour un budget par projet évalué entre 1 et 2 millions d'euros/an (montant à affiner). Afin que ces projets soient une réussite complète, il faudra y ajouter des actions de suivi de leur valorisation, soit au travers de nouveaux projets institutionnels ou industriels, soit en créant des startups qui porteront sur le marché ces démonstrateurs.

La présentation des 21 « *Moonshots* » sous forme de fiche Template permet pour une première phase de décrire les projets selon les objectifs (scientifique et technologique, sociétal) et faire une première analyse d'impact attendu (bénéfices attendus, marché ciblé). Elle est destinée avant tout à illustrer le concept. La MN n'a pas vocation à classer pour le moment ces projets, dont la maturité est très inégale. Une discussion avec la DG est nécessaire pour affiner les attentes sur les objectifs attendus, et les capacités de financement envisageables.

La mission numérique préconise le lancement de projets incitatifs dits « Moonshots », afin d'augmenter la visibilité du CEA sur ses axes forts et de fédérer des équipes transversales en mode projet, en accélérant la maturation de sujets porteurs. Un « moonshot » est un démonstrateur de rupture scientifique ou technologique, présenté sous la forme d'un objet ou d'une expérience exposable et accessible à un large public. Une vingtaine d'exemples a déjà été listée.



f. Recherche « Blue Sky »

Au-delà des « Moonshots », au-delà des recherches fondamentales amont et des recherches appliquées et partenariale dont l'objectif est de répondre à des questions s'inscrivant dans des feuilles de route technologiques et industrielles, la recherche exploratoire est une composante clef de la stratégie de recherche du CEA. Cette recherche dite aussi « blue Sky » peut être définie comme dépourvue d'applications court terme mais mue par la curiosité et les grands défis pour les sciences et les technologies. L'exemple de référence de cette recherche « curiosity driven » dans le secteur privé est le laboratoire Bell qui a marqué l'histoire avec ses 7 prix Nobel. Cette recherche « blue Sky » recouvre ainsi la recherche fondamentale explorant les frontières de la connaissance mais aussi une part de recherche technologique de rupture par exemple dans le domaine des nouveaux matériaux. Bien que sans garantie de résultats, seul ce type de recherche peut permettre des percées scientifiques parfois inattendues et conduire à des changements de paradigmes et des révolutions technologiques. Pour récolter les fruits de cette recherche exploratoire il faut comprendre les potentiels de rupture de ces nouvelles avancées et être parmi les premiers à les développer.

Cette recommandation vise à créer une animation spécifique autour des concepts nouveaux explorés par la recherche et des idées de ruptures, grâce à des projets exploratoires spécifiques associant recherche fondamentale et recherche technologique.

Le nombre de sujets correspondant à cette approche est limité par nature, les incertitudes sont très grandes, ce qui nous paraît justifier une modalité dédiée. Voici deux exemples qui pourraient s'y prêter :

1. Le calcul frugal : réfléchir à des solutions 1 000x plus efficace en associant les compétences en calcul avec d'autres physiques (Spintronique ou calcul bio mimétique)
2. les possibilités ouvertes par une association de la compréhension fine du fonctionnement des cellules avec la nanoélectronique

Le focus sur les organoïdes sur puces lancé actuellement illustre la fécondité de cette approche, même sous une forme préfigurative. Les rencontres des neurosciences et du numérique ont déjà conduit à la révolution de l'intelligence artificielle. La compréhension du cerveau et du système nerveux, de la pensée et de la conscience étant un domaine de recherche fondamentale jeune et fécond avec un immense potentiel de découvertes, ce domaine de la pensée artificielle pourrait être riche de ruptures. La topologie a fait son irruption en matière condensée avec la mécanique quantique tout comme les quasi-particules et autres excitations élémentaires exotiques, ces propriétés étonnantes pourraient transformer le transport et le traitement de l'information au niveau élémentaire. Le vivant au niveau molé-

culaire s'est révélé une machinerie incroyable pour traiter de l'information allant bien au-delà de son codage dans l'ADN, cela pourrait conduire à une nouvelle informatique bio-inspirée...

Les GAFA ont créé en leur sein des « labs » dédiés à ce type de recherche, avec des objectifs certes parfois discutables, mais une créativité certaine.

Le modèle d'organisation correspondant est d'une équipe intégrée, non soumise à la recherche de financements, menant ses travaux de manière très indépendante et confidentielle. Cette modalité serait donc réservée à un très petit nombre de sujets emblématiques, sur lesquels le CEA veut se doter d'une solution propre, susceptible si elle prospère de contribuer à l'excellence nationale.

La mission numérique propose d'explorer dans certains domaines très spécifiques des concepts et des idées de ruptures, grâce à des projets exploratoires spécifiques associant recherche fondamentale et recherche technologique. Cette recherche exploratoire dite « Blue Sky » peut faire émerger des voies originales pour traiter des objectifs fondamentaux comme la frugalité du numérique ou les organes artificiels.



g. Qualité des chercheurs

Le nombre d'offres d'emploi en France dans le domaine du numérique ne cesse d'augmenter. A titre d'exemple, les offres d'emploi d'ingénieurs en intelligence artificielle ont plus que triplé entre 2016 et 2018 et la branche de la cybersécurité connaît une croissance de 6 à 8 % de ses effectifs chaque année.

Attirer et retenir les talents dans le domaine du numérique est un véritable défi, souligné unanimement par les GT. Le CEA doit faire face à une situation concurrentielle forte liée l'implantation sur le plateau saclaysien notamment de grands centres de recherche (IBM, Thalès, TOTAL, EDF, Siemens...) aux plus proches des compétences recherchées. De plus, si les sujets ou projets proposés sont similaires, les niveaux de rémunération proposés dépassent largement ceux du CEA.

Face à ce constat de territoire compétitif et de difficulté à trouver certaines compétences à l'extérieur, plusieurs pistes sont envisagées :

- Capter les jeunes en amont, en les recrutant en sortie d'école ou à travers l'alternance. Ils peuvent ainsi faire l'expérience de l'environnement CEA. Les équipements de pointe, la multidisciplinarité et les conditions de travail CEA sont autant d'atouts mis en avant par les collaborateurs une fois présents mais parfois ignorés avant leur embauche.
- Identifier les écoles cibles et organiser des actions de sourcing directement auprès de ces écoles.

- Proposer davantage de thèses CEA pour répondre au besoin de profils ciblés exprimés par les différentes directions opérationnelles.
- Renforcer l'attractivité du CEA par la communication
- Favoriser la formation en interne. Le numérique adresse de nombreux domaines et nécessite souvent de combiner plusieurs compétences (intelligence artificielle et capteurs, informatique et mathématiques). Ainsi, il est tout particulièrement adapté de proposer des formations apportant des compétences complémentaires permettant de pouvoir traiter les sujets dans leur globalité. Plusieurs universités ou écoles d'ingénieurs dispensent des formations allant de quelques jours à trois semaines. Des formations entre collaborateurs peuvent également se mettre en place.
- Favoriser les mobilités transverses. Ces mouvements permettent d'amener de nouvelles compétences dans un autre environnement et d'en développer de nouvelles pour permettre une fois encore d'avoir des profils disposant de double compétences.
- Accompagner les souhaits de mobilités des collaborateurs désirant expérimenter d'autres environnements de travail (autre site CEA, mobilité externe...) en leur proposant des statuts de mise à disposition ou congés sans solde.

Il n'entre pas dans les compétences de la mission de qualifier plus avant ces propositions, qui font l'objet de réflexions par ailleurs. Nous tenions simplement à rappeler l'importance de ce point.

Alors que le nombre d'offres d'emploi en France dans le domaine du numérique ne cesse d'augmenter, le CEA doit faire face à une situation concurrentielle forte. Dans ce contexte, il est nécessaire de collecter les besoins et de proposer des pistes pour attirer et retenir les talents dans le domaine du numérique.



7. PARTENARIATS AU SERVICE DE LA STRATÉGIE DU CEA

Résumé

Le CNRS et Inria d'une part, les Universités Paris-Saclay et Grenoble-Alpes d'autre part ainsi que l'Institut Mines Télécom, sont tutelles de plusieurs unités avec lesquelles des collaborations ou des unités mixtes existent déjà et sont potentiellement à renforcer ou à créer. Compte tenu de leur nombre, des accords globaux de partenariat avec chacun de ces acteurs sont en cours ou envisagés afin de faciliter le suivi et la projection stratégique des actions communes.

En Europe et à l'international, les coopérations académiques permettent de participer à des recherches de haut niveau avec les meilleurs laboratoires mondiaux dans leur domaine. Il s'y ajoute pour ce qui concerne le plan européen, la constitution de réseaux et d'alliances visant à développer des actions de grande envergure, notamment lorsque celles-ci s'appuient sur des infrastructures de recherche scientifiques ou technologiques.

Les organismes de recherche technologique européens jouent un rôle particulièrement structurant dans ce cadre et le CEA a développé ou a vocation à développer des partenariats avec plusieurs d'entre eux. L'importance d'une présence active dans les grands réseaux et initiatives européennes est également à prendre en compte, de même que l'implication dans les partenariats structurants de Horizon Europe.

Conjointement pilotés par des représentants du monde de la recherche technologique et de l'industrie, les programmes de recherche partenariale ont vocation à soutenir les efforts de R&D des entreprises dans une vision moyen/long terme. L'essor de ces collaborations contribue à identifier les coopérations entre chercheurs et entreprises. Ce mode de fonctionnement est devenu dominant dans les domaines les plus en prise avec des enjeux industriels comme la microélectronique. La forte intensité capitaliste incite les acteurs publics et privés à s'associer afin de rester dans la course mondiale.

a. Partenariats académiques nationaux

Le CNRS et Inria d'une part, les Universités Paris-Saclay et Grenoble-Alpes d'autre part ainsi que l'Institut Mines Télécom sont tutelles de plusieurs unités avec lesquelles des collaborations ou des unités mixtes existent déjà et sont potentiellement à renforcer ou à créer.

Compte tenu de leur nombre, des accords globaux de partenariat avec chacun de ces acteurs sont en cours ou envisagés afin de faciliter le suivi et la projection stratégique des actions communes. Elles correspondent à la double nécessité d'une coopération à l'échelle nationale et à l'échelle des sites, permettant de couvrir l'ensemble des modalités de recherche pratiquées par les chercheurs au quotidien.

Il existe déjà une forte densité de liens avec le CNRS et Inria. Les stratégies d'accélération du PIA4 et dans certains cas le fait de piloter conjointement un PEPR renforcent l'utilité d'un partenariat global. A la date de rédaction sont concernés les domaines quantiques et cybersécurité dont le pilotage scientifique est partagé avec ces 2 organismes. On peut anticiper que les champs suivants amènent également à un renforcement des collaborations : éducation numérique (CNRS, Inria), cloud et verdissement du numérique (Inria volet Cloud, CNRS et Inria volet verdissement), santé numérique (Inria), Intelligence artificielle (Inria et CNRS), Robotique et IHM (Inria et CNRS), Machines et systèmes intelligents (Inria), Microélectronique (CNRS).

Le tableau ci-dessous croise les axes mis en avant par la mission numérique et les axes prioritaires respectivement du CNRS et d'INRIA. Il apparaît clairement des intérêts mutuels qui ne donnent pas actuellement lieu à des réflexions partagées et pourraient prendre place dans un contrat de collaboration stratégique.

CEA	CNRS	INRIA
AXE1 — Solutions matérielles et logicielles pour accompagner les voies du calcul	Matière, information et technologies quantiques Le futur du calcul	Algorithmes et information quantique
AXE2 — Systèmes de calcul distribués communicants	Le futur des communications	Calcul distribué et haute performance
AXE3 — Perception numérique capteurs avancés et instrumentation	Systèmes autonomes et interactifs	Le traitement des données depuis l'acquisition jusqu'au HPDA en passant par le edge
AXE4 — IA de Confiance, IA embarquée	Fondements de l'intelligence artificielle : modèles, données et algorithmes	IA responsable
AXE5 — Cybersécurité	Un monde numérique sûr	Sécurité Numérique
AXE6 — Usine et installation du futur	Systèmes autonomes et interactifs	
AXE7 — Numérique au service de la transition énergétique	Materials by design	Numérique pour le développement durable et l'énergie
AXE8 — Numérique frugal et durable	(Le futur du calcul)	Numérique frugal

Concernant l'Université Paris-Saclay de nombreux liens et initiatives existent. Le CEA est directement partie prenante de sa construction. S'il est compatible avec les accords antérieurs, un accord spécifique sur le numérique pourrait permettre de : i) faire reconnaître le pôle Digihall comme pôle d'innovation des technologies numériques pour le campus Paris-Saclay et facilitateur pour la valorisation des résultats dans le domaine et ii) densifier les liens dans les domaines d'excellence commune entre l'Université Paris-Saclay et le CEA (Quantique, Cybersécurité, intelligence artificielle, Spintronique notamment).

Le partenariat avec l'Université Grenoble-Alpes est déjà bien développé et s'inscrit totalement dans la politique de site et de l'IDEX. Les 10 UMRs de la DRF à Grenoble rassemblées dans l'IRIG, sont à minima en co-tutelles de l'UGA. Les partenariats ont vocation à se renforcer dans les domaines du quantique, de la cybersécurité, de la simulation numérique, des réseaux intelligents, ou de la simulation des composants et de la gestion et valorisation de la donnée.

L'IMT a à la fois un caractère national avec des écoles dans l'ensemble du territoire, et un ancrage particulier dans le campus Paris-Saclay via l'IPP (Institut Polytechnique de Paris). Il a aussi une relation historique avec Digihall. Des accords existent déjà entre des écoles de l'IMT et des instituts du CEA, en particulier avec IMT Atlantique (conception de composants, robotique biomimétique) et les écoles de télécom (ParisTech et SudParis) en particulier dans les domaines des réseaux et infrastructures de communication, de la cybersécurité et des systèmes de calcul distribués. Via les liens avec IPP, des partenariats existent avec l'Ensta en particulier dans les domaines de la robotique intelligente et la simulation multiphysique.

Au-delà de ces cinq acteurs globaux, il existe un certain nombre d'unités, le plus souvent mixtes entre un des deux organismes et des universités locales qui méritent le plus souvent un approfondissement ou une concrétisation des collaborations. Notons en particulier le LIRMM dans les domaines des architectures de calcul, de la cybersécurité et de la robotique ou le LAAS à Toulouse, dans les domaines de l'IA embarqué, de la robotique et de l'électronique de puissance. L'IRISA à Rennes, qui a pour tutelles en particulier les cinq acteurs cœur est aussi un partenaire avec lequel il serait nécessaire d'établir des collaborations dans les domaines de la cybersécurité, des architectures de calcul et des systèmes de calcul distribué. Le tableau ci-dessous liste quelques collaborations ponctuelles qu'il conviendrait d'approfondir suivant les axes mis en évidence par les groupes de travail.

Grands axes du numérique	Collaborations académiques hors partenariats nationaux
Axe 1 : Solutions matérielles et logicielles pour le calcul de demain	architectures de calcul : LIRMM, IRISA
Axe 2 : Systèmes distribués communicants	systèmes répartis : IRISA
Axe 3 : Perception numérique (IHM, Capteur)	instrumentation intelligente : INT Marseille perception : ISIR
Axe 4 : IA de Confiance, IA embarquée	IA embarqué : LAAS
Axe 5 : Cyber sécurité	composants : LIRMM outils : IRISA
Axe 6 : Usine et installation du futur	robotique : ISIR, LAAS, LIRMM, ENSTA jumeau numérique : ENSAM
Axe 7 : Numérique au service de la transition énergétique	puissance : LAAS



b. Partenariats académiques européens et internationaux

Les coopérations académiques en Europe et au plan international permettent de participer à des recherches de haut niveau avec les meilleurs laboratoires mondiaux dans leur domaine. Il s'y ajoute pour ce qui concerne le plan européen, la constitution de réseaux et d'alliances qui visent à développer des actions de grande envergure notamment lorsque celles-ci s'appuient sur des infrastructures de recherche scientifiques ou technologiques.

Les organismes de recherche technologique européens jouent un rôle particulièrement structurant dans ce cadre et le CEA a développé ou a vocation à développer des partenariats avec plusieurs d'entre eux :

- Le partenariat entre les trois plus grands instituts de recherche en microélectronique européens CEA-Leti, l'IMEC et l'alliance microélectronique des instituts (Mikroelektronik) Fraunhofer, prévoit ainsi d'optimiser les complémentarités des équipements et des savoir-faire des trois acteurs. Il cible le développement, le test et l'expérimentation de briques technologiques clés pour les composants neuromorphiques et pour le calcul quantique, et vise plusieurs domaines d'application tels que l'intelligence artificielle, les super calculateurs, la cybersécurité, mais aussi le véhicule autonome, la mobilité intelligente, la santé personnalisée, etc. Ce partenariat a déjà donné lieu à des projets communs et ambitionne d'être la base du programme TEF (reference and testing facility) pour les composants de l'IA embarquée en cours de préparation par la commission européenne.
- L'alliance HTA (heterogeneous technology alliance) avec VTT, CSEM et Fraunhofer (Mikroelektronik), est une plateforme regroupant les experts des 4 institutions sur le More than Moore, et analyse les différents appels à projets européens pour préparer des réponses communes. Cette initiative efficace a vocation à être poursuivie.
- Bien que le CEA et le Fraunhofer soient souvent en concurrence vis-à-vis des programmes européens, ils sont tous deux membres d'EARTO et d'EUROTECH et il existe de nombreuses collaborations ponctuelles. A l'instar de l'accord qui existe avec VTT et de l'accord en discussion avec TNO (envisagé notamment sur l'IA), un accord général serait utile, permettant un échange régulier pour rechercher des convergences et mettre en place des coopérations en regard d'une part, porter un message commun au plan européen sur les sujets dont la vision est partagée d'autre part.
- Il existe un accord général CEA-Helmholtz qui donne lieu notamment avec le FZJ à des coopérations fructueuses dans les domaines du numérique (HPC, technologie quantiques traitement massif des données, spintronique...) et qu'il convient de poursuivre.

L'importance d'une présence active dans les grands réseaux et initiatives européennes (e.g. Flagship et QCN pour le quantique, Sparta pour la cybersécurité, Claire, Ellis, AI4EU pour l'IA, Gaia-X, et EOSC pour le cloud, SpintronicFactory pour la spintronique, PRACE et EuroHPC pour le numérique intensif, EIT pour le Manufacturing avancé, ...) est également à prendre en compte de même que l'implication dans les partenariats structurants de Horizon Europe (KDT, successeurs de EURobotics et BDVA, EuroHPC...).

Au plan international trois collaborations sont plus particulièrement identifiées avec trois institutions américaines :

- Stanford, notamment sur les volets architecture de circuits et cloud
- MIT, notamment pour les aspects usages
- Berkeley, sur les aspects architecture de processeurs en particulier RISC V.

Au plan Européen et international, des collaborations plus ponctuelles sont à rechercher avec les leaders de leur domaine. Le tableau ci-dessous en liste quelques-unes identifiées par les groupes de travail.

Grands axes du numérique	Collaborations internationales hors accords cadre
Axe 1 : Solutions matérielles et logicielles pour le calcul de demain	
Axe 2 : Systèmes distribués communicants	communications quantiques : ETHZ systèmes répartis : Université de Cornell, UCL
Axe 3 : Perception numérique (IHM, Capteur)	instrumentation multimodale : EPFL instrumentation intelligente : UCL, EPFL perception : CeTI (TU Dresde)
Axe 4 : IA de Confiance, IA embarquée	IA de confiance : université de York IA embarqué : université polytechnique de Valence
Axe 5 : Cyber sécurité	composants : université de Graz, université de Stanford outils : EPFL, université de Graz
Axe 6 : Usine et installation du futur	robotique : MIT jumeau numérique : Chalmers fabrication additive : université de Cranfield
Axe 7 : Numérique au service de la transition énergétique	puissance : université de Stanford réseaux intelligents : NREL



c. Partenariats industriels stratégiques

La montée en puissance des programmes de recherche partenariale représente une évolution majeure des politiques scientifiques au cours de ces dernières décennies. Conjointement pilotés par des représentants du monde de la recherche technologique et de l'industrie, ces programmes ont vocation à soutenir les efforts de R&D des entreprises dans une vision moyen/long terme.

Dans un contexte marqué par l'accroissement de la part des financements sur projet et des contrats industriels dans le budget des laboratoires, l'essor de ces collaborations contribue à intensifier les coopérations entre chercheurs et entreprises. Il est désormais devenu dominant dans les domaines les plus en prise avec des enjeux industriels comme la microélectronique.

La très forte intensité capitalistique incite les acteurs publics et privés à s'associer afin de rester dans la course mondiale.

Les partenariats industriels les plus structurants du CEA sont regroupés dans le tableau ci-après. Ils sont regroupés par blocs dans certains dispositifs thématiques comme :

- Nano 20XX ; ST, Soitec, Lynred, Aledia
- Plan quantique : Atos, startups issues de la recherche
- Stratégie cyber : Thales

Ces dispositifs structurent l'innovation en France dans ces domaines et dans le cadre européen IPCEI.

Pour les applications de l'énergie, EDF et RTE sont incontournables.

En fabrication additive HP est le leader mondial en puissance, avec une forte implantation en Europe.

En instrumentation comme en robotique, les partenariats sont moins concentrés en raison de la diversité des applications.

Enfin le CEA a des partenaires stratégiques parmi les systémiers comme Safran, Renault ou Valeo pour des objets complexes comme le traitement d'image, l'architecture électronique du véhicule, l'usine du futur ou des capteurs avancés.

Au-delà de ce socle national auquel le CEA est profondément lié, pour des raisons économiques et de souveraineté, les collaborations internationales concernent surtout des entreprises américaines :

- Applied Materials, leader mondial des équipements de microélectronique. C'est un partenariat stratégique au sens où il permet au CEA de mettre au point des procédés avancés liés à l'équipement.
- Intel partenaire historique du CEA pour le HPC
- Quelques très grandes entreprises leaders mondiales avec trois finalités :
 - Maintenir les équipes CEA à l'état de l'art mondial au contact des meilleurs industriels
 - Accompagner la mise au point d'une technologie qu'un partenaire français est susceptible de produire ensuite pour le compte du partenaire étranger
 - Conforter la réputation d'excellence du CEA

Grands axes du numérique	Collaborations Industrielles principales
Axe 1 : Solutions matérielles et logicielles pour le calcul de demain	Technologies FDSOI et mémoires : STM Substrats : SOITEC Architectures HPC et quantique : ATOS
Axe 2 : Systèmes distribués communicants	Communication quantique : Quandela Composants Telecom : STM, Soitec Systèmes répartis : à définir
Axe 3 : Perception numérique (IHM, Capteur)	Ecrans : Aledia Imageurs : STM(visible) et lynred (IR) Instrumentation : Siemens ?
Axe 4 : IA de Confiance, IA embarquée	IA de confiance : Thales IA embarquée : Valeo
Axe 5 : Cyber sécurité	Composants cyber : Thales
Axe 6 : Usine et installation du futur	Jumeau : EDF FAB 3D : HP
Axe 7: Numérique au service de la transition énergétique	Composants : ST Reseaux : RTE



d. Vue d'ensemble des partenariats : nécessité scientifique et vecteurs de la mission du CEA

Les travaux du CEA dans le domaine numérique se développent à différents niveaux de maturité technologique, comme on l'a vu.

Dans les domaines de la connaissance et les domaines éloignés du marché, le CEA évolue dans le champ international, dont les modes de fonctionnement s'imposent à tous les acteurs. Les partenariats de recherche avec des laboratoires français et étrangers, dans le cadre des programmes de recherche partenariale français et européens sont au nombre de plusieurs centaines. Ils sont indispensables à la stimulation des idées nouvelles, au renouvellement des technologies et à la créativité des laboratoires comme on l'a vu ci-dessus.

Récemment les collaborations structurantes dont sont coutumiers les grands instruments scientifiques sont apparues de plus en plus nécessaires au numérique afin de mobiliser des masses critiques de compétence et de s'aligner avec la compétition mondiale. Au premier chef, c'est avec INRIA et le CNRS que doit s'organiser le partenariat, afin de structurer une part importante de la recherche en numérique en France et d'aborder ensemble des sujets d'ampleur comme le quantique, la cybersécurité ou l'IA de confiance. Un accord cadre permet de fixer les principes relatifs à la PI, à la gestion des programmes, etc, puis des accords particuliers le prolongent, par

exemple pour des projets allant jusqu'à la mise en place d'équipes intégrées, l'hébergement etc.

Ces accords sont complétés par des partenariats de site avec les équipes universitaires (exemple par l'UGA et le CHU pour l'exploitation de Clinattec).

A l'international, les partenariats européens montent en puissance dans le domaine précompétitif sous l'impulsion des programmes de la CE.

Avec la crédibilité croissante du CEA dans le domaine, les partenariats progressent aussi avec quelques très grandes universités américaines, particulièrement réputées dans ce même domaine.

A un niveau de maturité plus élevé, plusieurs modes de transfert vers l'industrie et in fine au marché s'offrent au CEA :

- Les projets précompétitifs, multi partenariaux avec des industriels : projets nationaux type PSPC ou ADEME (ex. : briques de base pour les CPS), projets européens type ECSEL ;
- Les projets bilatéraux avec un partenaire industriel ;
- Les programmes « *affiliate* » ou un ensemble de partenaires co-financent une plateforme commune (exemple factory lab à Saclay) opérée par le CEA ;
- Et quand aucune entreprise existante n'est encore candidate à la production de la technologie :
 - La création de startup financée par le capital risque ;
 - La création d'un véhicule dédié avec des partenaires industriels.

Un mode commun à ces variantes est la création de valeur par la mise en production d'une technologie nouvelle. Cette finalité correspond à la mission du CEA, telle que définie par son décret fondateur. Elle produit un bénéfice socioéconomique pour le pays qui se chiffre en milliers d'emplois créés et en dizaines de milliards de valeur économique. La mesure de ce bénéfice est un exercice difficile qui a néanmoins été effectué à plusieurs reprises²⁰. La mesure est bien sûr plus facile pour les startups créées (exemple Soitec, 1 500 emplois, capitalisation boursière 5,5 milliards d'euros).

Un autre mode commun à ces variantes est, le plus souvent, la mise en place d'un flux de R&D dans la durée entre le CEA et son partenaire (dont il est parfois actionnaire), associé à une valorisation du background PI.

Mais ces variantes sont différentes dans leurs attendus et leur chemin d'accès au marché. Elles ne sont jamais choisies au hasard, très rarement interchangeables :

- **Multi partenarial** : répond au souhait d'industriel de ne pas financer seul un sujet, qui en intéresse d'autres, surtout si leurs marchés sont disjoints, et d'accéder à une aide publique
- **Bilatéral** : répond au souhait de confidentialité et d'exclusivité de l'industriel. En général pour un marché assez proche

²⁰ : Voir les études longitudinales menées par l'état pour le suivi des programmes nano (cabinet Reverdy), l'étude réalisée par l'INSEE en 2019 dans le périmètre DRT, et l'étude E&Y en 2017 dans le même périmètre.

- **Affiliate** : souvent associé à une plateforme technique assez lourde. Souvent regroupant des équipementiers/*techno providers* et des *end users* avec le CEA. Vise aussi la dissémination d'un procédé ou d'un équipement (exemple robotique, composant électronique de masse)
- **Startup** : pallie une « défaillance de marché » en quelque sorte. Présente l'inconvénient de devoir construire un outil de production et de vente ex nihilo. Peut servir de « rampe de décollage » avec un rachat en phase intermédiaire de développement par un grand groupe, estimant qu'un certain « dérisquage » a été effectué. A l'avantage d'une continuité naturelle dans la maturation de la technologie par le CEA, qui devient fournisseur de la startup pour la parfaire. Difficultés bien connues : réussir des levées de fonds importantes (en dizaines ou centaines de M€) pour faire face à des coûts de maturation élevés, accéder aux premiers marchés de grande taille. La solution d'entrée au capital de groupes étrangers puissants répond en même temps aux deux questions (investisseurs — clients) mais crée un risque fort de départ des emplois.
- **Véhicule dédié** : évite le besoin de construire une base industrielle en s'appuyant sur une entreprise déjà installée. Nécessite un engagement du CEA à un niveau de capital significatif, qui « rassure » le porteur industriel. Permet une agilité comparable à la startup.

La MN recommande que le CEA soit en mesure d'activer les différentes options, pour chaque nouvelle opportunité de transfert. Elles viennent clairement en appui de la stratégie numérique esquissée ici et en représentent un des principaux aboutissements. A cet effet, il conviendrait de professionnaliser encore plus une approche qui est déjà l'une des plus affinées en France à l'heure actuelle :

- **Pour le multi partenarial** : deux points sont essentiels :
 - Le taux de financement : il doit permettre de couvrir tous les coûts restant à charge des unités. C'est le cas pour les programmes européens. Il reste à obtenir un taux satisfaisant pour les programmes nationaux, en particulier au plans de relance, à l'ANR et au PIA4
 - Les échanges en amont relatifs au contenu des programmes : une forte mobilisation a eu lieu à l'occasion des stratégies d'accélération et des PEPR notamment. Elle a permis de mettre en visibilité les sujets d'intérêt pour le CEA et fait ressortir les complémentarités avec d'autres organismes. Le besoin de ces actions est récurrent. Au niveau européen, le CEA est moins représenté et sans doute moins visible que ses homologues RTO étrangers : c'est un point de progression souhaitable.
- **Pour le bilatéral** : une démarche a été engagée pour rendre les contrats bilatéraux plus transverses au sein du CEA. La difficulté consiste à rendre transparente pour l'industriel la complexité d'un aussi vaste organisme pour n'en faire apparaître que la richesse. A cette fin, on devra « automatiser » les éléments récurrents : gestion de compte, PI, taux de facturation, mode d'engagement, etc. Par ailleurs, en exécution, le CEA a été amené récemment à intervenir sur des projets à proximité de la mise en production de masse, avec des contraintes de temps et de performances très fortes. Il est ainsi appelé à se doter de compétences spécifiques : chefs de projet industriel, traitement de lots à temps de séjour très court, constitution d'équipes mixtes matériel/logiciel, intégration étroite avec des personnels du partenaire...

- **Pour l'*affiliate*** : le CEA le pratique beaucoup moins que l'IMEC par exemple, en raison de la préférence nationale qu'il s'oblige à observer. Pour cette raison, la microélectronique par exemple est exclue de ce mode. Néanmoins il reste d'autres domaines, comme l'usine du futur, ou l'IA embarquée, ou le modèle pourrait être plus utilisé, ce qui va nécessiter un certain apprentissage de la part du CEA
- **Pour les *startups*** : la démarche Magellan complétée par une approche spécifique sur quelques dossiers, ainsi que les outils CEA I et fonds supernova forment l'armature du dispositif CEA et sont suivis dans le cadre de la démarche innovation.
- Pour les véhicules dédiés, de récents projets énergie ont ouvert la voie. Un retour d'expérience peut en être tiré sur les méthodes de conduite accélérée des discussions jusqu'au *closing*, de valorisation du *background* CEA, de *staffing*, etc.

Globalement et quel que soit le mode retenu, ces relations avec un industriel à niveau de maturité élevé sont un marqueur de la spécificité du CEA et doivent à notre sens être cultivées et organisées. Les formes où le CEA est investisseur ajoutent une dimension supplémentaire de compétences à mobiliser : si les opportunités en ce sens se développent, ce qui semble pouvoir être le cas, une réflexion sera à mener pour accompagner ce mode de transfert.



8. FAVORISER UNE INSERTION RESPONSABLE DU NUMÉRIQUE DANS LA SOCIÉTÉ ET ACCROÎTRE LA VISIBILITÉ DU CEA DANS CE CHAMP

.....

Résumé

Les technologies du numérique et les usages qui en découlent changent notre société de manière systémique : elles bouleversent les modalités des rapports sociaux, le fonctionnement de la société et celui du monde du travail. De façon générale, les questionnements de la société autour du numérique s'articulent autour de quatre niveaux :

- Comment garantir la protection et la sécurisation des données personnelles ?
- Quel impact sur le monde du travail ?
- Les usages du numérique, notamment à travers les réseaux sociaux peuvent-ils conduire à la dissolution du contrat social ?
- Quelle réaction face à des objets technologiques dont les performances, et en particulier l'« intelligence » nous dépassent ?
- Quel usage sera fait de ces technologies ?
- Quel sera l'impact environnemental du déploiement de ces technologies ?

La mission numérique préconise de doter le CEA d'un comité opérationnel d'éthique sur le numérique, ceci pour permettre au CEA de structurer une démarche pour mieux prendre en compte les questions éthiques et sociologiques liées au progrès des technologies et à leur diffusion.

Outre la création de ce comité, la mission préconise plusieurs axes de travail :

- Renforcer l'animation (ateliers, séminaires...) et le dialogue interne ainsi que les compétences du CEA en sciences humaines et sociales (SHS), en s'appuyant sur les compétences internes et sur des collaborations avec des laboratoires externes spécialisés en SHS ;
 - S'interroger sur les modalités d'une participation des chercheurs du CEA au débat public ;
 - Valoriser les activités de diffusion de la culture scientifique et technique ;
 - Investir de nouvelles formes de communication.
-

a. Numérique et société

Le numérique : des technologies à fort pouvoir transformant qui suscitent attentes et préoccupations

Les technologies du numérique et les usages qui en découlent changent notre société de manière systémique : elles **bouleversent les modalités des rapports sociaux, le fonctionnement de la société et celui du monde du travail**. L'ampleur de ces évolutions et leur impact direct sur la vie de chaque citoyen créent un effet d'hystérésis sur les controverses courantes suscitées par les applications de la science en général et du numérique en particulier, clivant la société entre d'une part le camp des pourfendeurs du numérique et d'une virtualisation de la société qu'il favorise, et d'autre part, celui de ses thuriféraires, convaincus qu'il résoudra les défis de notre époque. Si tous reconnaissent le caractère profondément transformant du numérique sur nos sociétés, il faut noter que sa diffusion laisse un **pan de la population à l'écart de la révolution en cours**, avec une tendance à accentuer la fracture sociale avec un accès aux technologies du numérique pas accessibles à tous (désert numérique et capacités à utiliser des outils et objets de plus en plus complexes). Enfin, si chacun se forge - et peut exprimer - une opinion quant aux bénéfices et risques liés à ces technologies, seule une très faible minorité en comprend les sous-jacents techniques et scientifiques.

De façon générale, les questionnements de la société autour du numérique s'articulent autour de quatre niveaux :

- Comment garantir la **protection et la sécurisation des données personnelles** et par-là protéger la vie privée face aux capacités de surveillance que permettent ces technologies ainsi que la sécurité face aux risques de piratages et autres actes de cybermalveillance ;
- Quel **impact sur le monde du travail** de l'arrivée de robots toujours plus performants, avec une première interrogation sur la **déshumanisation du travail**, toute fonction étant analysée comme l'exécution d'un programme (avec l'émergence de l'homme-machine), la question de la **substitution de l'homme par la machine** - avec la problématique du devenir des salariés impactés et de leur adaptation à de nouveaux métiers - et enfin celle de **l'étendue du rôle accordé au robot** devenu plus « intelligent » que l'homme ; derrière ces questions se pose celle d'un « brouillage de plus en plus irréversible des distinctions entre l'humain et les machines » ;
- Les usages du numérique, notamment à travers les réseaux sociaux peuvent-ils conduire à la **dissolution du contrat social** en favorisant la création de communautés d'individus partageant les mêmes centres d'intérêt et opinions, isolées des autres communautés et donc sans possibilité de débat contradictoire, donnant la primauté au soi ou à l'entre soi connecté et à la communauté virtuelle sur l'ordre politique ;
- Quelle **réaction face à des objets technologiques dont les performances, et en particulier l'« intelligence » nous dépassent** : plus philosophique, cette question renvoie à l'hypothèse d'une « honte prométhéenne » qu'éprouverait l'homme face à la qualité des choses qu'il a fabriquées et qui pourrait le conduire, soit dans une course contre la machine, l'amenant à intégrer les technologies lui permettant d'accroître ses performances (« homme hybride ») soit à cultiver ce qui le différencie de la machine, son humanité.

Compte tenu de la diversité de ses applications potentielles, y compris en matière de prise de décisions et de manière autonome, l'intelligence artificielle suscite des interrogations éthiques

et juridiques qui concernent tant l'apprentissage machine (biais de sélection des données, transparence des algorithmes, robustesse...) que l'utilisation des algorithmes.

Plus généralement, les préoccupations et craintes associées aux différents enjeux identifiés par la mission concernent tout d'abord **l'usage qui sera fait de ces technologies** :

- **par qui et avec quelle finalité**, qui pose les questions de l'accès aux données, de la sécurité des technologies développées et de leur protection vis-à-vis de piratages mais également de leur utilisation possible par des organisations criminelles ou à des fins liberticides ;
- **avec quelles limites**, notamment avec le développement de capacités d'observation des états cognitifs et émotionnels susceptibles d'être considérées comme intrusives ou encore leur utilisation pour remédier à un handicap versus la recherche d'une augmentation des capacités sensorielles et physiques de l'homme.

Une deuxième source de crainte découle de **l'impact environnemental du déploiement de ces technologies** en termes de consommation d'énergie et de ressources ainsi que de capacité de recyclage en fin de vie.

Enfin, les **questions sociales** associées aux **barrières à l'accès à ces technologies** et à l'impact de leur diffusion sur le **marché de l'emploi** ne sont pas les moins importantes.

La nécessité pour le CEA de structurer une démarche pour mieux prendre en compte les questions éthiques et sociologiques liées au progrès des technologies et à leur diffusion

Pour le groupe de travail numérique et société, le CEA — dont les activités dans le numérique sont encore peu connues et qui doit **consolider sa légitimité dans ce domaine** — doit concourir à **conforter la confiance dans le numérique** et à **apporter un éclairage scientifique sur les controverses** qu'il suscite. Dans cette démarche, le CEA est bien conscient que l'évolution du numérique et sa diffusion seront déterminées avant tout par des impératifs de marché sur lesquels il n'a aucune prise. Pour mener une action réaliste et efficace, il importe avant tout de bien comprendre cette évolution et d'en analyser les tendances. Ceci n'est possible qu'en étant un acteur significatif, embarqué dans les projets des leaders du domaine. Fort de cette connaissance, la plus intime possible, des tendances et des déterminants majeurs, souvent peu apparents, le CEA pourra apporter un point de vue pertinent à ses tutelles, formuler des recommandations de politique publique ou concevoir des garde fous *by design*, et enfin donner à ses chercheurs des éléments objectifs pour un regard éthique sur leur travail.

La mission préconise cinq axes de travail :

- Doter le CEA d'un **comité opérationnel d'éthique sur le numérique**, à l'instar de ce qui existe à l'INRIA ou à l'UPS, comparable au comité d'éthique du CEA traitant des recherches impliquant des expérimentations animales ; ce comité pourrait s'appuyer sur les recommandations des collègues d'éthique spécialisés de l'alliance Allistène (CERNA) et du CNPEN (comité national pilote d'éthique du numérique) ;
- **Renforcer l'animation** (ateliers, séminaires...) et le dialogue interne ainsi que les **compétences du CEA en sciences humaines et sociales (SHS)**, en s'appuyant sur les compétences internes et sur des **collaborations avec des laboratoires externes spécialisés en SHS** ;

- S'interroger sur les modalités d'une **participation des chercheurs du CEA au débat public**, à travers un chantier à ouvrir sur l'identification des porteurs et de lignes directrices sur cette participation ;
- Valoriser les activités de **diffusion de la culture scientifique et technique**, notamment dans le numérique et, ce faisant, expliquer son action et renforcer son attractivité ;
- Investir de **nouvelles formes de communication** notamment en développant ses programmes « Arts et Sciences ».



b. Implication du CEA dans les standards et la normalisation

Un acteur important du numérique ne peut se tenir éloigné des questions liées aux environnements de développement, aux standards, à la visibilité des licences, aux benchmarks et à la normalisation.

Différentes options stratégiques peuvent être envisagées pour accompagner le déploiement de technologies et protocoles développés par le CEA et en accroître la visibilité: choisir la normalisation (ou la standardisation) ou bien poursuivre une stratégie de standardisation de fait, protéger sa PI versus aller vers l'open-source, définir une politique de publication. Les réflexions à ce sujet doivent notamment intégrer les stratégies d'alliances et la maturité des écosystèmes sur lesquels le CEA peut s'appuyer.

La maîtrise des normes ou standards est compatible avec une stratégie de protection par brevets dès lors qu'en tant que brevets essentiels à l'application d'une norme, ceux-ci sont rendus accessibles dans des conditions FRAND (*fair, reasonable, accessible and non-discriminatory*). Dans le numérique, les deux entreprises les plus représentatives de cet effet « maîtrise des normes » sont Intel et Microsoft. L'exemple du Fraunhofer peut être également cité avec l'émergence du standard MP3 et l'Industrial data space qui a contribué à l'émergence de Gaia-X. Citons enfin la visibilité du DOE sur le HPC, l'impact du NIST sur les concours en sécurité et IA, ou la visibilité d'Inria avec SciKit Learn, Scilab, OCaml ou CoQ que l'établissement a poussé comme standards de fait, par une politique open source suivie.

Pour ce qui concerne le CEA, plusieurs exemples du bénéfice — en visibilité, en influence et en capacité à soutenir une stratégie dans la durée — d'une implication sur la normalisation, ou l'émergence de standards par l'intermédiaire d'une politique open source ou d'un transfert peuvent également être mentionnés (non exhaustif):

- L'écosystème logiciel open source mis en place par le CEA (e.g. OpenHPC) qui lui assure un accès et une maîtrise de technologies logicielles clés pour les grands systèmes de calcul.
- L'implication dans Autosar dans le domaine de l'ingénierie système pour l'automobile.
- Le développement de Plateformes ou Framework (Papyrus, Frama-C, Lima, Pixano, ExpressiF, Streamer, Salome, Trust, Uranie...) accessibles en open source.

- La diffusion ou la participation à de grands codes (e.g. Abinit...) ou le développement ainsi que la mise à disposition des communautés de suites logicielles concernant par exemple la simulation des accélérateurs (licence CEA) ou l'astrophysique (via Cosmostat ou Github).
- Enfin le SOI ou les imageurs *shutter free*, comme exemples de standards issus de technologies du CEA et industrialisées par les partenaires SOITEC et STMicroelectronics.

Toutefois, plusieurs cas récents peuvent s'analyser comme n'ayant pas été détectés ou soutenus suffisamment pour s'imposer comme des standards alors qu'ils étaient ou sont des avancées notables :

- Sensinact, framework unifié (2016) servant à intégrer et à gérer les équipements IoT relevant de différents protocoles (>10), à recueillir leurs données et à permettre le développement d'applications, est disponible sous Eclipse. Dans ce cas l'impossibilité d'assurer le service utilisateur a joué négativement;
- N2D2, plateforme de conception de systèmes d'IA pour une performance optimale sur plateformes embarquées était en 2016 en avance sur la concurrence mais a manqué de financement interne jusqu'en 2021, où N2D2 se trouve au cœur de la proposition de plateforme souveraine proposée dans la stratégie nationale IA phase2. Entretemps le niveau de concurrence d'outils élaborés sur base TensorFlow (Google), PyTorch (Facebook) ou commerciale (Cartesian par ex), est nettement plus élevé qu'en 2016-2017;
- Dans le domaine matériel, l'approche par interposeur passif ou actif a été pensée également il y a plus de 4 ans et a donné lieu depuis à des démonstrations (EPI ...) ou des reprises par les partenaires industriels. Il a été envisagé à l'époque d'en faire un standard ouvert mais cette voie s'est rapidement refermée faute de financement envisageable hors d'une approche propriétaire. Elle semble désormais intégrée dans la roadmap de grands acteurs comme Intel.

Par ailleurs, l'implication dans les groupes de normalisation ou se mobilisant pour l'émergence d'un standard, est de manière générale en retrait en France comparativement à l'Allemagne ou aux USA. Le CEA ne fait pas exception. Il est d'ailleurs frappant de constater en analysant les rapports des groupes de travail que ce sujet apparaît peu ; le développement scientifique ou technologique apparaît comme la préoccupation première, ce qui est naturel pour un organisme de recherche.

Le domaine du numérique a quelques caractéristiques spécifiques qui donnent un relief particulier à la question des standards et de la normalisation :

- C'est un domaine industriel avec un rôle important de la normalisation;
- Mais aussi un domaine à cycle court avec des standards de fait nombreux, en particulier sous l'impulsion d'acteurs dominants (GAFAM, INTEL, NVIDIA, ARM, IBM...). Les politiques d'open source sont parfaitement maîtrisées par ces grands acteurs (e.g. Github relevant de Microsoft, RedHat sous contrôle IBM également promoteur de l'initiative OpenPower, TensorFlow développé par Google, Open source@Nvidia...);
- Les politiques open source sur le logiciel et le matériel se développent de manière continue;

- Dans le domaine scientifique les politiques open data sont en train de se développer fortement;
- Les règles export US, font peser une forte menace sur la capacité à disposer des logiciels ou matériels en open source dépendant des fondations principalement basées aux USA ; une démarche de développement de fondations miroirs en Europe, ainsi que de serveurs sur sol et sous contrôle Européen est donc nécessaire;
- La complexité matérielle et la complexité logicielle sont sans cesse croissantes et font l'objet régulièrement de la mise au point d'outils visant à les rendre accessibles à un utilisateur *'homme de l'art'*. Le CEA est candidat à proposer des cadres de réduction de ces complexités et à les adopter.

La détention de ressources spécifiques ne suffit pas pour imposer et diffuser un standard. Il faut pour cela déployer une gestion adéquate des droits de PI couplée à une stratégie d'alliance permettant de renforcer le positionnement de la technologie poussée tout en s'appuyant sur une approche marketing agressive basée sur des stratégies de communication. Dans ce contexte, il est proposé de mettre en place, sur les deux prochaines années, des actions sur les plans suivants :

1. Construire et partager au sein des acteurs CEA, un logigramme de décision concernant la mise en open source des logiciels et la recherche de visibilité associée : définition du rationnel par rapport à un transfert direct à un partenaire, avantage attendu en termes de visibilité, conditions de celle-ci (y compris existence de fournisseur de technologies de service, besoin d'une structure de support, maintenance et correction de bug assurant le sérieux de ces solutions vis à vis des utilisateurs potentiels), avantages en termes de souveraineté, d'auditabilité, de masse critique, de bassin utilisateur, existence ou non d'une fondation européenne, à défaut effort à effectuer pour en faire émerger une...
2. Procéder de même par la construction d'un logigramme de décision pour ce qui concerne la possibilité de mettre en open source ou en visibilité via des plateformes d'IP, des avancées matérielles issues des recherches CEA, ou de rejoindre officiellement des groupes d'utilisateurs d'IP ouvertes (à l'instar de RISC V) et effectuer une prospective régulière des écosystèmes technologiques ouverts émergents.

Ces deux propositions seront à articuler avec la politique de transfert avec des industriels nationaux et qui donne la priorité à celui-ci.

3. Renforcer la construction ou participation à des alliances intégrant dans leur SRA les questions de standardisation au sens large sur les sujets d'intérêt pour le CEA, notamment autour des fondations et initiatives mises en place sous l'impulsion des stratégies d'accélération, en Franco-Allemand ou par la commission européenne; Mutualiser également avec ces Alliances nos réseaux et capacités d'influence.
4. Installer un groupe de travail permanent sur la normalisation, constitué d'experts métiers, afin de renforcer la capacité du CEA à :
 - Identifier en avance de phase les normes en émergence ;
 - Intégrer et être force de proposition de solutions techniques aux sein des groupes de normalisation, et de contribution à l'organisation de benchmarks dans les groupes de normalisation ;
 - Accompagner la montée en puissance du CEA sur le domaine en mentorant les nouveaux acteurs CEA.

Cette action suppose de mettre en place supports et financements pour faciliter la participation active aux groupes de normalisation/standardisations dans le scope des activités du CEA

5. Mener une action de communication sur les grandes licences du CEA (cf. mp3)

6. Traiter spécifiquement :

- L'émergence de standard dans le cas particulier des technologies quantiques. Des sujets tels que le fondement de la vérification du calcul quantique ou le développement de démarches de simulation quantique, ou encore la pile logicielle (ouverture à discuter) permettant d'interfacer un accélérateur quantique à un calculateur HPC pourraient par exemple être portés par le CEA ;
- Les sujets liés à la réduction de complexité du monde numérique pour l'homme de l'art (cf *Moonshot deeplab*, solutions de continuité *edge-cloud*).



c. Visibilité du CEA

La notoriété du CEA dans le champ numérique n'est pas encore à la hauteur de son potentiel. Ce décalage est sans doute dû au fait qu'une partie de ses actions est couverte par la confidentialité industrielle. La mission recommande un effort spécifique pour le corriger. Les modalités devront faire l'objet d'un travail avec les directions compétentes, nous nous contentons ici de formuler quelques suggestions d'actions, en fonction d'objectifs complémentaires :

- Incarner l'activité numérique du CEA par des interviews dédiées de l'AG dans les media pertinents (Echos, Figaro, Monde, TV, réseaux sociaux)
- Regrouper l'activité numérique du CEA au sein d'un stand « CEA Digital » au salon Vivatech et au CES.
- Mettre en évidence la couverture globale du champ du numérique par CEA-CNRS-INRIA en organisant une manifestation professionnelle annuelle par les trois organismes en partenariat avec un media national, en s'efforçant d'en faire un événement de référence du numérique en France
- Prévoir des actions de communication en direction du grand public, s'appuyant sur les « *Moonshots* »
- Organiser une manifestation annuelle à destination des jeunes et des familles à l'occasion de la fête de la science (exemple : Experimenta)
- Donner un écho aux missions confiées par les tutelles aux CEA au soutien de la définition de politiques publiques (à l'image de la mission confiée à INRIA sur l'IA)
- Faire un focus sur les startups à plus fort potentiel issues du CEA en fonction de leur actualité (bond de valorisation, mise de produits sur le marché, construction d'usine, levées...)

ANNEXE I – RÉSUMÉ DES COMPÉTENCES PAR DOMAINE

Lors de la première phase des travaux de la mission numérique, neuf groupes de travail ont analysé les compétences du CEA dans les domaines du numérique. Ils ont produit neuf rapports intermédiaires qui ont été repris par la suite dans les travaux de la mission. Ci-dessous un résumé des définitions des compétences et enjeux identifiés par les experts de chaque groupe. Ces rapports intermédiaires sont disponibles à la demande.

Les compétences dans le domaine de l'IA

La thématique de l'intelligence artificielle recoupe les activités de toutes les directions du CEA avec des contributions significatives dans chacune. Son analyse a fait apparaître 4 grands sous domaines très équilibrés en termes de ressources et d'impact :

[Sous-thématique]	Mots clefs / Description
Algorithmie et confiance	Performance, robustesse, sûreté, frugalité, vie privée, apprentissage incrémental, apprentissage fédératif, multimodal
Vision et langues	Extraction d'information multimédia, agents conversationnels, reconnaissance d'objets et de comportement, aide à la conduite
Microélectronique et logiciels pour l'IA embarquée	Architecture modulaire, évolutive, mémoires résistives, mémoires non volatiles, calcul impulsif, apprentissage embarqué
L'IA pour les métiers	Santé et omique, physique nucléaire, astrophysique, matériaux, cybersécurité, contrôle non destructif

Globalement, l'IA est un domaine qui touche un grand nombre des activités du CEA et des domaines du numérique, mais deux axes structurants émergent en réponse à des attentes et des enjeux sociétaux forts :

- « IA responsable » : développement responsable d'intelligence artificielle pour l'industrie et la société. Cela englobe les trois verrous de l'IA embarquée, l'IA frugale, et de l'IA de confiance ;
- La « maîtrise des données » à travers la mise en place d'une « infrastructure de capitalisation et d'exploitation souveraine des données pour les métiers ».



Les compétences dans le domaine de l'ingénierie système

Le périmètre thématique « Ingénierie des systèmes », inclut plus largement l'ingénierie des systèmes et des logiciels, les méthodes formelles pour la conception et la validation, le jumeau numérique, l'ingénierie dirigée par les modèles (MBE pour « *Model-based Engineering* »), les cadres techniques logiciels (« *Framework* » en anglais et nommés aussi cadriceils).

Sous-thématiques	Mots clefs / Description
Ingénieries système et logicielle	Outils cognifiés, cadres technologiques logiciels dédiés architectures et algorithmes distribués et de confiance.
Méthodes et technologies formelles	Vérification de programmes Analyse statique de code Analyse dynamique de code Logique et vérification, Spécifications formelles Sûreté de fonctionnement Cybersécurité.
Jumeaux numériques	Niveau système vs. niveau physique Approches multi-physiques, multi-échelles spatiales et/ou temporelles maîtrise des incertitudes de simulation impact sur le cycle de vies des systèmes complexes.

Plusieurs thèmes émergents sont identifiés :

- Cognification des outils d'ingénierie système et logiciel et architectures logicielles cognitives (par ex., pour les systèmes auto-adaptatifs).
- Le génie logiciel pour les architectures quantiques et l'interfaçage (interopérabilité) entre unité de calcul classique et cœur quantique.
- Intrication entre les outils de développement tout au long du cycle de vie,
- Jumeaux-numériques « auto-adaptatifs » (« *Life digital twin* »)
- Ingénierie de la connaissance 2.0 : prise en compte des temps long des systèmes (plusieurs générations d'ingénieurs et utilisateurs se succèdent durant le cycle de vie du système)
- Gérer d'un point vue systémique (holistique) les aspects multi-échelles structurels et temporels.



Les compétences dans le domaine des capteurs

Le CEA, dans l'ensemble de ses activités de recherche et de développements technologiques, met en œuvre une très grande diversité de capteurs originaux de haute performance et adaptés à différents environnements. Les compétences concernent toute la chaîne de Capteurs (transduction, signal analogique, traitement « proche capteur », protocoles de communication) :

[Sous-thématique]	Mots clefs / Description
Capteurs Chimiques	Capteurs chimiques, physico-chimiques et biochimiques (transduction optique, résistive, électrochimique), nanotubes de carbone, couches minces d'oxydes, oxydes nanoporeux. Instrumentation RMN et hyperpolarisation pour améliorer la sensibilité. Capteurs polluants de l'air, métaux lourds et polluants dans l'eau, lidars et mini capteurs, nano structuration 3D, micro fluide, multiplexage, nez et langue électroniques
Magnétisme et spin	Capteurs magnétiques, RF, traitement signal, technologie pour l'IOT
Rayonnements	Capteur photon unique, Capteur, électronique
Imagerie médicale et bioimage	Bio-informatique, imagerie, Imagerie haut champ, Imagerie TEP-IRM
Intégration 3D	Technologies d'assemblage 3D
Imageurs	Capteurs imageurs numériques des X au THz et fabrication
Capteurs et actuateurs	Capteurs physiques (pression, température, force, champs, CND Lidars et capteurs biochimiques Actionneurs simples et rendu de sensation haptique, US...
Capteurs pour instrumentation	Capteurs à FO, scintillateurs organiques et imageurs gamma

Les thèmes émergents sont :

- En termes de technologies :
 - Le traitement proche capteurs et l'IA embarqué (Edge IA) — capteurs intelligents ;
 - La convergence de la microélectronique, de l'intégration 3D et des briques technologiques sensibles, la miniaturisation, le durcissement, la fiabilisation et la réduction de la consommation énergétique.
- En termes d'usages, les domaines dans lesquels les perspectives d'émergence de Capteurs numériques sont fortes sont :
 - Le domaine de l'économie circulaire et du retraitement ;
 - Le domaine du monitoring (usine du futur, CND, fabrication additive, sanitaire, batteries...) ;
 - Le domaine de la santé et des dispositifs médicaux ;
 - Le domaine des capteurs « pour le bien-être » (émotions, vêtements intelligents...).

Les autres domaines ne sont pas en reste, notamment la défense, la mesure en milieux hostiles, les capteurs pour l'analyse biochimique, pour la perception de l'environnement. Dans tous ces secteurs, les innovations sont de plus en plus courantes et l'appropriation des technologies numériques s'installent.



Les compétences dans le domaine de l'IHM

Dans ce domaine le CEA couvre le périmètre des interfaces sensorielles, des capteurs comportementaux et de la réalité étendue. Les interfaces sensorielles sont des interfaces matérielles conçues pour transmettre des stimulus sensoriels de l'ordinateur vers l'utilisateur. Elles permettent la capture de données et l'immersion de l'utilisateur dans le monde virtuel et/ou augmenté en sollicitant ses sens. Les thématiques concernées sont :

[Sous-thématique]	Mots clefs / Description
Haptique	captation et restitution du touché haute définition, algorithmes de contrôle des vibrations, nouveaux usages de l'haptique
Audio	Mems, algorithmes de directivité et spatialisations, traitement du langage, mesure des émotions
Displays	Imageurs, traitement d'image (analyse de scènes, reco. de gestes et faciale), visualisation sur murs d'images
Capteurs sensoriels	Technologie wearables, mesure des émotions
Capteurs comportementaux	Reconnaissance de gestes et postures, technologie capteurs (inertiels, acoustiques)
Réalité virtuelle	Simulation, multiphysique interactive, mannequin biomécanique
Réalité augmentée	Algorithmes de suivi et de recalage précis et robustes, réseaux de antagonistes génératifs
Visualisation	Visualisation de données massives et hétérogènes. Données complexes issues de logiciels de conception et de simulation

Quatre thèmes émergents sont identifiés :

- L'affichage multi sensoriel et les IHM multi expérience ;
- La réalité étendue ;
- Le rendu naturel réaliste ;
- *Ubiquitous Computing* et l'interaction Ambiante.



Les compétences dans le domaine du calcul

La thématique couvre tous les aspects nécessaires pour concevoir, réaliser, développer et utiliser les systèmes de calculs, aussi bien dans leur aspect matériel que logiciel. Elle couvre donc les aspects suivants:

Sous-thématique	Mots clefs / Description
Quantique	Matériaux quantiques, composants quantiques, spintronique, calcul quantique, bits quantiques supraconducteurs, semi-conducteurs, de spin, algorithmes quantiques, processeurs quantiques, montée en échelle, correction d'erreur quantique, NISQ
architecture et solutions matérielles	Développement d'architectures et d'accélérateurs spécialisés performants (à la fois « à la périphérie » et hautes performances), utilisant les dernières technologies développées soit en interne ou en externe (Intelligence Artificielle, « apprentissage profond », opérateurs de sécurité, calcul en mémoire ou proche mémoire, empilement 3D, mémoire non-volatiles, photonique, calcul quantique...), en lien étroit avec le savoir-faire applicatif
Logiciel	Suivre l'évolution des architectures, développement de frameworks fiables et communs pour le support des systèmes hétérogènes et modulaires, (et aussi spécialisées, e.g. pour l'IA — connexion simulation et IA, construction d'une pile logicielle entre écosystème classique et quantique), tenant compte du savoir -faire applicatif (« codesign » architecture matérielle / pile logiciel / applications).

Les thèmes émergents sont :

1. Dans le domaine matériel

- a. Technologie : transistors GAA (nanowires et nanosheets), mémoires non volatiles et 3D monolithique (empilement vertical de transistors)
- b. Architecture : nouveaux modèles de calcul (neuromorphique et quantique) et de communication
- c. Assemblage : SoC, 2.5D et empilement 3D

2. Dans le domaine du logiciel

- a. Support des processeurs nouvelle génération (RISC)
- b. Lien avec le quantique, virtualisation, support du parallélisme et de la fiabilité
- c. Middleware d'interopérabilité pour calcul distribué
- d. Workflow pour logiciel correct par construction



Les compétences dans le domaine de la robotique/cobotique

La robotique est une activité historique du CEA qui a développé la téléopération pour les besoins de l'industrie nucléaire. L'activité s'est diversifiée dans le domaine du manufacturing au travers de la cobotique et de la robotique collaborative et aujourd'hui relève le défi de l'intelligence artificielle pour accroître le degré d'autonomie des robots. Les sous thématiques sont :

Sous-thématique	Mots clefs / Description
La robotique / cobotique	les aspects recherche en matériel et en logiciel, ainsi que l'intégration et les applications
La simulation interactive	Jumeau numérique
Les process	Notamment le contrôle non destructif, auquel il faut ajouter la fabrication additive
Les CPS (Cyber Physical Systems)	intégrant les capteurs et les systèmes de capteurs.

Les thèmes et usages émergents qui concernent l'activité de recherche en robotique sont nombreux et concernent plusieurs domaines d'activités :

- Manufacturing : Industrie 5.0 : Remplacer l'homme au cœur de l'usine, Usines flexibles, agiles : Logistique, e-commerce, relocalisation de certaines fabrications pour des enjeux de : souveraineté, de création d'emplois et d'empreinte carbone (transport, matières premières)
- Santé : Santé à domicile (robot compagnon), Aide aux personnes, handicap, Excellence opérationnelle des hôpitaux (productivité), Aide au praticien
- Environnement : Green deal, Efficacité thermique bâtiments, rénovation , Recyclage, tri des déchets
- Agriculture : Mécanisation pour remplacer les produits phyto. et pallier au manque de main d'œuvre
- Infrastructures/Energie : Exploitation (surveillance, inspection), Maintenance, Environnements hostiles (nucléaire)
- Robotique grand public (Compagnon, Relation publique, Chatbot, assistant)
- Mobilité, Véhicule autonome, Robot taxi, Livraison du dernier km
- Spatial, Exploration, Fabrication en orbite
- Défense : Robotique mobile



Les compétences dans le domaine des matériaux

Seul le numérique pour le matériau a été considéré, sous l'angle des avancées que le numérique peut apporter dans la conception des matériaux. L'axe matériau pour le numérique, axe fort et historique du CEA, n'a pas été pris en compte. À noter également que le domaine médical, très spécifique, n'est pas traité. Deux grandes catégories ont été identifiées :

[Sous-thématique]	Mots clefs / Description
Conception numérique des matériaux	La conception numérique des matériaux qui s'appuie sur la caractérisation, l'analyse d'images et des données expérimentales mais aussi les approches multi-échelles de la simulation des matériaux
Fabrication Additive	La fabrication additive qui a besoin de contrôle non destructif dès la conception, d'optimisation des procédés et qui tend vers le jumeau numérique du procédé pour une meilleure qualité et une confiance accrue des clients

Trois thèmes émergents ont été identifiés et doivent servir d'axes structurants sur lesquels, il convient d'articuler les activités « numérique pour les matériaux » développées au CEA.

- Jumeaux numériques
- Intelligence artificielle (IA) notamment le machine learning (ML) appliqués à la conception des matériaux, à l'analyse et leur fabrication (FA en particulier).
- Operando des procédés de fabrication des matériaux et des analyses des données en temps réel.

Adossé à ces trois axes structurants, un quatrième thème émergent a été identifié: mise en place, normalisation, suivi statistique et gestion de bases de données performantes pour les matériaux et les procédés de fabrication (FA en particulier). Ce thème est transverse aux trois axes ci-dessus.



Les compétences dans le domaine de l'énergie

Le périmètre du domaine de système d'énergie couvre des systèmes comportant: électrique, thermique, gaz, avec les aspects ICT et marché. Il s'agit d'un domaine vaste et concerne plusieurs types de thématiques:

[Sous-thématique]	Mots clefs / Description
Numérisation des Réseaux d'énergies	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des sources ENR (PV, Eoliennes, Marine...) • Maîtrise de la Demande en Energie - Pilotage de charges (flexibilité, autoconsommation, efficacité énergétique...) • Protection, automatisation, self-healing et diagnostic • Services numériques innovants: service système, marché..., Cyber sécurité, Interopérabilité (modèle d'échange de données, SCADA...) • Système multi-physique (électricité, chaleur, froid, power to gaz, H2, fuel cells...)
Electronique et stockages d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> • BESS (batteries), volant d'inertie, supercapacité, thermique, H2); • Gestion intelligente distribuée de BMS, FCMS • Electronique de puissance (GaN, SiC, IGBT, onduleurs...) • Observabilité (capteurs, prévision, monitoring,...)
Smart city.	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des véhicules électriques • Microgrids

Les thèmes en rupture dans le domaine de système d'énergie sont :

1. Modélisation et simulation des systèmes d'énergie;
2. Stratégies de Gestion et contrôle intelligents;
3. Protection, Diagnostic, Observabilité, Interopérabilité, Application de TIC (Cybersécurité, Big-Data, AI).



Les compétences dans le domaine de la cybersécurité

Le périmètre Communication et sécurité recouvre des activités conduites par les quatre directions opérationnelles (DAM, DES, DRF et DRT) :

[Sous-thématique]	Mots clefs / Description
Cybersécurité	Cyberattack - hacking - Situational awareness -Cyberthreat intelligence - Endpoint detection and response -Authentication -Public key infrastructure -Biometrics -Software security - Blockchain -Distributed trusted ledger - Cryptography -Cryptology design -Cryptologic protocols - Security Models - Formal methods -(Theory of) security - (Theory of) privacy - Security services -Intrusion detection -Anomaly detection -Malware (mitigation) - Systems security - Network security - Database security -Storage security - Application security - Hardware security - Security in hardware -Hardware attacks -Reverse-engineering -Bug bounty -Cloning -Penetration testing -Security test tools - PUF - RNG -Secure elements Trusted Platform Module -Hardware security Module -Forensics - Root of trust - security assessment - anti-tampering technologies
Communication	RF components (LDMOS - Power amplifier - Tunable filter - Optical wave guide -optical fiber) - Wireless connection (Wifi, Bluetooth, WLAN, GSM, CDMA, HSPA, WI Max, RFID, NFC GPS 5G-6G, 4G LTE, UHD, Lora), Antenna, LIFI, SDN (Software-Defined Networking), NFV (Network Function Virtualization), Network management, Programmable networks, Deterministic communications - Resilience - Simulation, Security-by-design, Privacy-by-design
Communication quantique	Quantum internet, Quantum key distribution, Quantum random number generator, Device-independent quantum information processing, Quantum networks, Automated design of quantum experiments based on reinforcement learning and simulated annealing, Single photon source, Single photon detectors, Source of entangled photon pairs, Spin-photon entanglement, Quantum memory,, Integrated quantum photonics, Electronic Quantum optics

Plusieurs thèmes émergents sont identifiés :

- Cybersécurité
 - Cybersécurité des objets connectés (et intelligents)
 - Cybersécurité des infrastructures critiques (et intelligentes)
 - Le renforcement de la protection de la vie privée des citoyens
- Communications
 - nouveaux services numériques (localisation, télétransmission) et e nouveaux composants haute performance
 - Prise en compte du risque cyber créant une demande de solutions de communications « secure by design »
 - Remplacement de la transmission filaire par des approches sans fil
- Communications Quantiques
 - Développement de protocoles pour un renforcement de la confidentialité
 - Mise au point de technologies quantiques photoniques performantes pour les communications quantiques :
 - Mise au point de technologies quantiques électroniques permettant de simuler des fonctionnalités de réseaux quantiques sur table
- Blockchain



ANNEXE II – PLATEFORMES UTILISÉES PAR DOMAINE

Les rapports intermédiaires des groupes de travail compétence ont aussi recensé les principales plateformes disponibles au CEA. Cette annexe liste les principales plateformes utilisées par les neuf domaines de compétences.

Plateformes utilisées dans le domaine de l'IA

Plateformes	Description	ETP et Coûts de la plateforme
Plateforme Nanelec 300	Plate-forme Nanoélectronique 300 mm (Salles blanches, équipements lourds)	100 équipements lourds, 3 300m ² de salles blanches, 200 chercheurs et techniciens, 70 brevets par an, 25M€ CAPEX / an
Plateforme ingénierie logicielle et système	Papyrus : Environnement open source d'ingénierie pour les systèmes et les logiciels : gestion d'exigences, spécification, conception, analyse de risques, validation, intégration... (DRT) Frama-C : Environnement open source d'analyse et de validation de sûreté et de cybersécurité des logiciels : analyse de code, preuve de propriétés, stabilité numérique, test (DRT)	→ 110 ETP → 2 M€ d'investissement / an
Plateforme calcul Factory-IA	Infrastructure de calcul dédiée à l'IA basée apprentissage (hébergée au TGCC) : unité de calcul parallèle, espace de stockage de masses de données, partenariats industriels sécurisés - (DRT)	→ 4 ETP → 1 M€ d'investissement / an
Plateforme N4HCloud	Collecte et analyse de données en santé (DRF-NeuroSpin+TGCC)	R&D numérique en santé », 5 ETP, 3.5M€ (colonnes Calcul et IA)
Plateforme Milady	ML/AI pour la science des matériaux	
URANIE	Plateforme Incertitude & Optimisation basé sur le framework ROOT du CERN. Elle est développée par la DES et disponible en open source. Elle peut servir notamment à tout ce qui est contrôle-commande ou quantification d'incertitudes.	5 ETP



Plateformes utilisées dans le domaine de l'ingénierie

Plateformes	Description	ETP coûts de la plateforme
Plateforme d'ingénierie de confiance pour les logicielles et les systèmes complexes	La plateforme vise la maîtrise et l'optimisation des activités de conception et de validation en termes de coûts, qualité, performance, sûreté et sécurité. Ses équipements majeurs sont les deux ateliers logiciels ouverts Papyrus & Frama-C :	→ 1 100m ² de locaux, → 2 M€ par an d'investissements, → 110 ingénieurs et techniciens
Salomé	Plateforme de logiciels de simulations open-sources & multi-physiques, développée en partenariat avec EDF, pour simuler des structures industrielles complexes (centrales nucléaires, éolienne, barrage...).	500 ETPT (CEA+EDF)
Trust	La plateforme open-source TRUST, développée au sein du CEA/DES, permet la résolution des équations de Navier-Stokes incompressibles et sert de base logicielle pour le développement d'applications en thermohydraulique.	3 ETP
Simcryogenics	Simcryogenics est une bibliothèque pour MATLAB/ Simulink de composants cryogéniques qui permettra à terme de concevoir, modéliser, simuler et vérifier les systèmes de grande réfrigération et de leur contrôle-commande associé.	(bibliothèque de de modèles de composants cryogeniques) 3 ETP
Arcane Modane NabLab	Arcane est un framework codéveloppé par le CEA/ DAM et l'IFPEN qui est dédié à la construction de codes de calcul 2D/3D massivement parallèles (« High Performance Computing » HPC). Y sont associés des environnements de développement et un outil de conception du code basés sur le framework « Eclipse » (EMF).	
PhreeqCEA OSCAR BLOWFISH	PhreeqCEA est une "plateforme" de calcul scientifique dédiée à la physico-chimie. Elle est développée par le CEA/DES sur la base du logiciel libre Phreeqc. C'est aussi le noyau de calcul de chimie du code OSCAR exploité principalement par EDF et FRAMATOME. BLOWFISH est un applicatif utilisant PhreeqCEA, spécialisé dans la description de la physico-chimie dans les générateurs de vapeur. Il est intégré dans le jumeau numérique GV d'EDF.	0.5 ETP
URANIE	Plateforme Incertitude & Optimisation basé sur le framework ROOT du CERN. Elle est développée par la DES et disponible en open source. Elle peut servir notamment à tout ce qui est contrôle-commande ou quantification d'incertitudes.	5 ETP
MUSES	Plateforme de simulation mise en place au LITEN/ DEHT/SAMA permettant d'adresser diverses problématiques autour des batteries et des piles à combustibles, de l'échelle atomistique à l'échelle du pack.	90 ETPT



Plateformes dans le domaine des capteurs

Plates-formes	Description	ETP et Coûts de la plateforme
PF UBM	Plateforme "Ultra-bas Bruit Magnétique - UBM", installation unique en Europe de caractérisation de capteurs magnétiques.	Non disponible
PF Détecteurs Irfu	Plateforme de développement technologique de capteurs rayonnements et particules	
PFNC, PTA	Atelier de nanofabrication (Orme), Plateforme de Nano-caractérisation (Grenoble) avec FIB-SEM (échantillonnage parcimonieux), Plateforme de Technologies Avancées (Grenoble), Installations classées « centrales de proximité »	<p>PFNC: 3 000m² de locaux, 80 ETP, 30 M€ CAPEX</p> <p>PF Techno Amont (PTA) : 700 m² de locaux, 12 M€ CAPEX, 12 ETP, Ouverture extérieure académiques et industriels</p> <p>PF de nanofabrication SPEC (ADN) : 300m², 4 M€ CAPEX, Ouverture extérieure académiques et industriels</p> <p>PF de métrologie capteurs magnétiques : 350m², 5.5 M€ de CAPEX, Ouverture extérieure académiques et industriels</p>
LETS	Laboratoire d'électronique et traitement du signal (IRAMIS./SPEC)	
Plateforme nanoélec 300mm	Voir plus haut.	
Plateforme microsystems 200 et 300 mm	La plate-forme microsystems développe des capteurs, des actionneurs, des composants radiofréquence, des composants pour la photonique et l'infrarouge, des composants de puissance et des solutions de packaging intégré.	400 eq. lourds, 4 500m ² de SB, 340 ETP, 45 brevets/an, 2 M€ CAPEX/an

Plateforme photonique	La plate-forme Photonique est le plus important centre de R&D français de développement, de caractérisation et de simulation de composants et systèmes optoélectroniques. Son activité couvre la conception des dispositifs, les technologies des semi-conducteurs III-V et II-VI, la réalisation de composants, l'intégration système et le packaging.	300 eq. de recherche, 12 600m ² de locaux, 300 ETP, 45 M€ CAPEX, 60 brevets / an
CisLab	Plateforme technologique de conception, d'essais et de qualification de capteurs et instrumentation ouverte aux partenaires industriels et académiques. Tout type de capteurs peuvent être intégrés.	
Plateforme mécatronique pour l'amélioration des produits et procédés	La plateforme aide à intégrer des capteurs communicants dans des outils, des outillages et des pièces, pour apporter de l'intelligence au composant dans lequel ils sont intégrés.	
Plateforme intégration de systèmes optoélectroniques	Plateforme permettant aux industriels d'intégrer à leurs produits des composants optiques innovants.	
Plateformes d'essais en environnements représentatifs	Plateformes de traitements thermiques à haute températures (2000°C) et sous atmosphère contrôlée : fours résistifs, fours à inductions, chauffages rapides par LASER,... Possibilités d'imposer simultanément des sollicitations mécaniques Banc de test sous haut flux de chaleur (DRF) Moyens d'irradiations par faisceaux d'ions (JANNUS, GANIL,...), gamma (PAGURE - LABRA), neutroniques (RJH)	
Accès aux grands instruments nationaux et internationaux	Par ex. : ESRF, ILL, GANIL, CERN, SOLEIL, ...	



Plateformes dans le domaine de l'IHM

Plateformes	Description	ETP et Coûts de la plateforme
Plateforme Intelligence Ambiante	La plateforme est dédiée au développement de méthodes innovantes sur les IHM et le développement de nouveaux moyens d'interaction sensorielle. Elle intègre des outils tels que Mobilemii et la plateforme Skills : formation au geste technique chirurgical.	→ 150 collaborateurs, → 1 000 m ² de locaux, → 20 nouveaux brevets par an, → Plus de 5 M€ d'investissements
Plateforme de simulation interactive et réalité étendue	La plateforme de Simulation Interactive développe des systèmes de simulation interactive. Les 2 principaux équipements sont : → XDE Plateforme de simulation multi-physique interactive XDE, Salles Immersive RV, mettant en jeu un ou plusieurs intervenants humains réels pour des applications en Réalité Etendue (XR). → salle immersive et de réalité virtuelle IRFM Cadarache	→ 20 collaborateurs → 450 m ² de locaux → 2,5 millions d'euros d'investissements → 20 projets de R&D par an → 4 licences industrielles sur le moteur de simulation XDE
DIGISCOPE	Plateforme à la Maison de la Simulation avec l'écran MANDELBROT (mur d'écran stéréoscopique 2D et 3D),	
Plateforme microsystemes 200 mm et 300 mm	voir plus haut	→
Plateforme photonique	voir plus haut	
Plateforme PRESAGE²	La plateforme permet de simuler les phénomènes physiques rencontrés sur les installations nucléaires (calculs de dose interactif, liaisons cinématiques complexes, fluide) en élargissant au possible les données d'entrées (CAO, nuage de points, cartographie radiologique,...)	→ 1 M€ d'investissements → 200 m ² AR, VR plateformes



Plateformes dans le domaine du calcul

Plateformes	Description	ETP et Coûts de la plateforme
Nanoelec 300	voir plus haut	→
PTA	voir plus haut	
AdN du SPEC	Plateforme en cours d'évolution pour circuits spintronique, quantiques supraconducteurs et hybrides.	
Factory IA	voir plus haut	
Conception de circuits	Plateforme complète du LIST de conception de circuits numériques complexes, avec la plateforme SESAM qui permet le prototypage virtuel, le prototypage à base de FPGA, les outils d'émulations, de simulation et d'émulation matérielle (l'émulateur STRATO de MENTOR GRAPHICS est un matériel industriel et à une capacité d'émulation de 320 millions de portes logiques, possibilité de faire du co-design matériel/ logiciel, debug de design, etc).	180 ETP, 2500 m², 20 M€ CAPEX, 35 brevets /an
CCRT	Le Centre de Calcul Recherche et Technologie est un centre de calcul et de traitement de données qui a pour missions de répondre aux besoins de traitements numériques du CEA et de ses vingt partenaires en matière de grandes simulations numériques. Il propose à ces membres expertise et compétences dans le domaine du HPC/HPDA. Il favorise les échanges et les collaborations scientifiques entre le CEA et les partenaires industriels.	



Plateformes dans le domaine de la robotique/cobotique

- La plateforme de Robotique Interactive (SMART, Saclay Manufacturing And Robotics Technology Platform) accueille les développements menés par le CEA avec ses partenaires industriels sur des cobots, des exosquelettes et des robots collaboratifs.
- Les plateformes Usine du Futur (FFLOR), télé-robotique pour procédés industriels et contrôle non destructif (TROPIC) et assistance au geste sont 3 plateformes applicatives des technologies robotiques implantées dans 3 PRTTs du Grand Est, de Nouvelle Aquitaine et des Pays de la Loire.
- La plateforme de Contrôle Non-Destructif (GERIM) développe de nouveaux procédés et méthodes de contrôle, des capteurs et leur mise en œuvre notamment robotisée.
- La plateforme de Simulation Interactive développe des technologies de simulation de phénomènes physiques pour la réalité virtuelle ou augmentée.

Plateformes dans le domaine des matériaux

Plateformes	Description	ETP cumulés et coûts de la plateforme
Plateforme CSP	Centre de Simulation Prédictive : valoriser les développements en simulation /modélisation sur le centre de Grenoble dans les programmes de DRT et DRF et en lien avec les partenaires industriels.	25 experts
Plateforme AFH	La plateforme Additive Factory Hub (AFH) porte sur la maîtrise des procédés, l'interaction matériau-source d'énergie, la métallurgie, le contrôle, le monitoring et la sanction, l'optimisation et le chaînage numérique et les applications multi-matériaux. Elle intègre, développe et innove les technologies de Fabrication Additive pour des partenaires industriels (Air liquide, EDF, Safran...) et académiques.	
Plateforme Poudr'Innov 2.0	Issue des savoir-faire en métallurgie des poudres et en plasturgie, la plateforme développe depuis 2012 des composants « near net shape » à haute valeur ajoutée à partir de poudres métalliques, polymères, céramiques, semi-conductrices ou magnétiques. L'activité récente s'oriente vers les procédés de fabrication additive direct (FLLP, SLM) ou indirects (SLA, MBJ). La plateforme supporte des projets couvrant toute la chaîne de la valeur : formulation et préparation des poudres, conception avancée et simulation, calcul multiphysique, mise en œuvre des procédés, déliantage et frittage, post-traitements, caractérisation associée des poudres, des composants (plateforme voisine de nano-caractérisation PFNC).	45 ETPT et 10 M€ d'investissements
Plateforme SAMANTA	Saclay Advanced MANufacturing and Surface TreAtment: développement de procédés avancés et technologies émergentes, tels que la fabrication additive et le traitement de surfaces en phase vapeur à fort taux d'ionisation.	Approx. 30 ETPT
Plateforme CIVA	Plateforme de simulation pour la prise en compte du contrôle non destructif dès la conception, analyse des données de contrôle et diagnostic automatique.	600 ETPT (développement et validation du logiciel)
Plateforme SALOME	voir plus haut	
Plateforme URANIE	voir plus haut	
Plateforme MUSES	voir plus haut	
Plateforme PLEIADES	Plateforme logicielle pour la simulation des éléments irradiés dans les assemblages, en démonstration, expérimentation ou en service. Plateforme codéveloppée avec EDF depuis 2003.	170 ETPT, fort soutien EDF et FRAMATOME

Plateformes dans le domaine de l'énergie

Plateformes	Description	ETP et Coûts de la plateforme
Plateforme Smart Grid	<p>La plateforme système « smart grid » PRISME étudiée avec 50 partenaires industriels l'architecture, le dimensionnement, le contrôle et l'optimisation de systèmes électriques, à l'échelle d'une maison, d'un bâtiment d'un quartier voire d'un territoire.</p> <p>La plateforme s'appuie sur un simulateur de réseau temps réel, des convertisseurs, des panneaux photovoltaïques en toiture, des moyens de stockage variés (batteries, volant d'inertie, hydrogène).</p> <p>Elle peut tester différentes configurations de réseaux, définir des stratégies de pilotage et optimiser leur rentabilité. Elle collabore avec des acteurs industriels phares : RTE, Alstom, Alcen, SRD, SOREA, Urbasolar, etc.</p>	<p>300 m²</p> <p>100 personnes</p> <p>2 M€</p>
Plateforme Bâtiments	<p>La plateforme Énergétique bâtiment permet aux constructeurs et aux équipementiers d'améliorer la performance énergétique des bâtiments et leur confort intérieur : nouveaux modes constructifs, parois opaques et vitrées, matériaux, enduits, menuiseries spécifiques, systèmes de ventilation innovants, capteurs solaires, stockage thermique...</p> <p>La plate-forme compte plus de vingt partenaires industriels, dont des groupes internationaux. La durée moyenne des projets va de deux à trois ans. Ils visent un compromis optimal entre performance énergétique et objectifs de qualité des environnements intérieurs.</p>	<p>40 personnes</p> <p>1,5 M€</p>
Plateforme Mobilité électrique	<p>Pour développer un véhicule électrique ou hybride, la batterie (ou la pile à combustible) ne suffit pas : il faut l'intégrer dans la chaîne de traction, réaliser des essais en conditions réelles, analyser les résultats, optimiser l'ensemble... C'est la mission de la plateforme Mobilité électrique, qui travaille sur des applications automobiles et sur tous types de véhicules terrestres, aériens ou marins.</p> <p>Elle dispose d'un parc d'équipements complet, d'un banc moteur aux stations de recharge solaires en passant par les moyens d'instrumentation.</p> <p>Aux essais ponctuels (jusqu'à 60 000 km pour une voiture électrique) s'ajoute le monitoring en continu d'une flotte d'une trentaine de véhicules. La plate-forme Mobilité électrique permet ainsi à ses partenaires industriels, qui défrichent un marché inédit, de constituer un retour d'expérience, d'améliorer et de fiabiliser leurs produits avant commercialisation, voire de lancer des produits totalement nouveaux.</p>	<p>1 500 m²</p> <p>20 personnes</p> <p>4 M€</p>
Plateforme Réseau et stockage thermique	<p>Unique en Europe par sa taille et la diversité de ses activités de R&D, la plate-forme Réseau et stockage thermique développe les technologies innovantes qui permettent d'assurer la gestion de l'énergie thermique, de la récupérer, de la stocker en vue d'une utilisation ultérieure et de l'utiliser efficacement dans l'industrie ainsi que de la distribuer via les réseaux de chaleur : pompes à chaleur, chaudières, échangeurs thermiques, etc. Ces travaux mobilisent une cinquantaine de partenaires, dont des grands groupes comme ALCEN, ENGIE, Saint Gobain ou Total. Ils contribuent à l'amélioration de l'efficacité énergétique des composants et des systèmes : transferts de chaleur optimisés, stockage thermique, machines de conversion...</p>	<p>1 500 m²</p> <p>75 personnes</p> <p>15 M€</p>

Plateforme Solaire photo- voltaïque	<p>Participer au développement de la filière industrielle du solaire en France, c'est la vocation de la plateforme Solaire photovoltaïque (PV), une des plus importantes d'Europe avec 200 collaborateurs et 100 partenariats industriels, des PME aux grands groupes.</p> <p>Sur la technologie silicium, ses recherches portent sur les matériaux, sur les cellules et l'amélioration de leur rendement, ainsi que sur les modules solaires et leur optimisation. Cette plate-forme abrite des activités sur le PV organique par voie impression.</p> <p>La plate-forme Solaire photovoltaïque étudie aussi l'industrialisation de ses technologies. Dans son Labfab (environnement représentatif d'une ligne de production), la technologie silicium hétérojonction (HET) est développée dans le cadre d'un partenariat européen avec l'équipementier leader Meyer Burger.</p> <p>Enfin, elle accompagne le développement à l'export des PME françaises du solaire, pour la vente de leurs technologies et équipements, ou la réalisation d'usines de modules photovoltaïques clés en main.</p>	<p>15 000 m²</p> <p>200 personnes</p> <p>100 M€</p>
Plateforme Batteries	<p>La plateforme Batteries rassemble sur un même site les compétences et les équipements lourds permettant de développer et de fabriquer à petite échelle des batteries lithium-ion. Elle identifie et synthétise les matériaux qui optimisent les performances, fabrique les différents composants (électrodes, électrolyte, etc.), assemble les packs, les intègre dans des systèmes complets. La performance et la sécurité des batteries sont évaluées grâce à des tests qui peuvent aller jusqu'à leur destruction.</p> <p>La plate-forme dispose d'une vingtaine d'équipements lourds, en particulier une machine d'enduction et de remplissage d'électrolyte liquide et une ligne d'assemblage préindustrielle. Elle travaille sur des accumulateurs et des packs batterie lithium-ion de toutes tailles : les plus petits alimentent des implants auditifs de quelques grammes, les plus grands pèsent 300 kilos et équipent des bus électriques.</p>	<p>3 000 m²</p> <p>100 personnes</p> <p>40 M€</p>
Plateforme Production et stockage Hydrogène	<p>Exploiter l'hydrogène en tant que source d'énergie, grâce à des procédés innovants de production, et de stockage : c'est la mission de la plateforme Production et stockage hydrogène.</p> <p>Elle développe et qualifie des démonstrateurs de taille significative en partenariat avec des industriels.</p> <p>Parmi les autres débouchés de cette technologie : la coélectrolyse vapeur d'eau / dioxyde de carbone, pour produire des précurseurs de combustibles de synthèse (power-to-gas). Ces électrolyseurs peuvent fonctionner en mode réversible pile à combustible (SOFC) alimentée par de l'hydrogène ou par d'autres gaz (gaz naturel, biogaz). Application prioritaire pour ces piles : la cogénération.</p> <p>Enfin, la plate-forme développe des procédés de stockage solide basse pression de l'hydrogène, pour des applications stationnaires ou transports lourds.</p>	<p>1 500 m²</p> <p>20 personnes</p> <p>4 M€</p>

Plateforme Piles à combustible	<p>Forte de 6 millions d'euros d'équipements et d'une équipe de 40 ingénieurs et techniciens, la plateforme Piles à combustible propose une approche unique au monde de conception et d'optimisation des piles de type PEMFC. Cette approche couvre les matériaux, les assemblages membrane-électrode (AME), les stacks, le diagnostic, la modélisation et la caractérisation. Une dizaine d'industriels français et étrangers participent aux travaux, dont Symbio et Faurecia. L'objectif est d'accélérer les transferts entre recherche et applications (transports ou stationnaires) et de constituer une propriété intellectuelle forte : 10 à 20 brevets sont déposés chaque année.</p> <p>Les piles à combustible de la plateforme se situent à l'état de l'art mondial en termes de performances, de durée de vie et de compacité. Autant d'atouts qui permettent la réalisation de démonstrateurs et de prototypes pour des applications de niche.</p>	<p>1 500 m² 20 personnes 4 M€</p>
---	---	--



Plateformes dans le domaine de la cybersécurité

Plateformes	Description	ETP et Coûts de la plateforme
Plateforme Cybersécurité	Face aux attaques logicielles ou matérielles qui visent des applications informatiques, des circuits intégrés, des équipements électroniques portables (smartphones...) ou des systèmes embarqués, la plateforme Cybersécurité mobilise plus de 100 experts pour identifier les vulnérabilités des produits et développer des protections innovantes. Les études de vulnérabilité s'appuient sur des outils de haut niveau : logiciel d'analyse de code-source (Frama-C), simulateurs de plates-formes matérielles, bancs de tests dédiés pour reproduire des actions physiques sur les composants électroniques, injecter des fautes, analyser des signaux émis... La plateforme héberge d'ailleurs un Centre d'Evaluation de la Sécurité des Technologies de l'Information (CESTI) d'évaluation de sécurité de produits matériels commerciaux. Les techniques de sécurisation proposées font appel à des technologies innovantes : plateforme de communication sécurisée pour réseaux de capteurs, sécurisation de l'implantation matérielle et logicielle de cryptographie, applications de cryptocalcul pour le traitement applicatif direct de données chiffrées...	→ 1 300 m ² de locaux → 100 collaborateurs → 3,5 millions d'euros d'investissements
Plateforme ingénierie logicielle et système	La plateforme vise la maîtrise et l'optimisation des activités de conception et de validation en termes de coûts, qualité, performance, sûreté et sécurité. Elle assure l'évolution rapide et contrôlée des techniques de développement. Ses solutions s'appliquent aux logiciels et systèmes embarqués pour l'automobile, l'avionique, les réseaux de télécommunication, ainsi qu'aux grands systèmes distribués : supervision d'énergie, manufacturing ou gestion de transactions financières. Elle dispose d'outils au meilleur état de l'art et couvre la totalité du cycle de développement : cahier des charges, spécifications, conception, vérification, validation, déploiement, en lien étroit avec la conception matérielle. Elle travaille dans 3 domaines : le développement de cas industriels en partenariat ; les études, évaluations, expertises et formations ; l'adaptation et le développement d'outils pour les domaines métiers.	→ 1 000 m ² de locaux, → 2 M€ par an d'investissements, → 110 ingénieurs et techniciens
Plateforme conception de circuits intégrés	Voir plus haut	
Réseaux de capteurs et objets communicants	La plateforme aide les industriels à doter leurs produits ou services de fonctions innovantes. Elle couvre tout le cycle de R&D, de l'idée au démonstrateur, et propose un support à l'expérimentation et à l'industrialisation : une approche unique en France. Elle dispose d'un vaste portefeuille de technologies : capteurs, technologies sans fil et sans contact, récupération d'énergie... Grâce à une approche « système » des besoins, elle conçoit des fonctions adaptées aux enjeux du numérique (IoT, smart cities, véhicules communicants, usine numérique) et permet aux industries traditionnelles d'apporter de la valeur à leurs produits. Ces fonctions sont intégrées et caractérisées en laboratoire, puis testées et évaluées dans des environnements représentatifs ou réels grâce à des démonstrateurs fonctionnels.	→ 5 000 m ² de laboratoires et de bureaux, → 3 000 m ² d'espace extérieur instrumenté, → 200 ingénieurs, → portefeuille de 400 brevets

Plateforme microsystemes 200 mm et 300 mm	voir plus haut	
Plateforme Contrôle et Surveillance des Systèmes d'Information (COSY)	<p>La plateforme mène des travaux de R&D qui couvrent à la fois les aspects logiciels et matériels. Ses travaux visent à extraire les informations pertinentes, à aider à la décision, à faciliter le travail collaboratif quand les flux de données sont massifs, hétérogènes et partagés. Dans le domaine logiciel, les recherches portent sur l'affichage ergonomique des grands volumes de données, la gestion de contenus multidimensionnels (texte, image, vidéo), la détection d'événements anormaux et de signaux faibles.</p> <p>Equipements majeurs</p> <p>Salle pilote (war room) dédiée au traitement collaboratif de cyber-attaques à partir de scénario simulés.</p> <p>Implantation</p> <p>CTREG Toulouse</p>	<p>→ 100 m² de locaux,</p> <p>→ 0.4 M€ d'investissements</p>
Plateforme Sécurité physiques des systèmes électroniques	<p>Créée à Gardanne avec l'École des Mines de Saint-Etienne, la plateforme Sécurité physique des systèmes électroniques étudie comment les attaques physiques sur des composants électroniques (cartes à puce, téléphones portables) permettent d'accéder à leurs données d'entrée ou d'en prendre le contrôle.</p> <p>Equipements majeurs</p> <p>Laser picoseconde, moyens spécifiques pour attaques électromagnétiques</p> <p>Implantation</p> <p>CTREG Gardanne</p>	<p>→ 200 m² de locaux,</p> <p>→ Plusieurs millions d'euros d'investissements</p>



ANNEXE III –

LIENS DES ENJEUX DU NUMÉRIQUE AVEC LES MAILLES



	Maille	Axe
Transition énergétique	RUH et MCSAC	RUH - Construction (axe 1) RUH - Programme d'accompagnement (axe 2) MCSAC (axe 3)
		Réacteurs de 2e et 3e génération (axe 1) Amont du cycle (axe 2) Aval du cycle du combustible (axe 3) Comportement des déchets en stockage (axe 4)
		Activités transversales : installations Activités transversales : simulation
		Activités transversales : valorisation
	Nucléaire de demain	Réacteurs de 4e génération (axe 1) Aval du cycle du combustible (axe 2) Etudes de scénarios (axe 3) Activités transversales : installations Activités transversales : simulation
		Production renouvelable décentralisée (axe 1) Stockage (axe 2) Vecteur hydrogène (axe 3) Réseaux électriques et pilotage de la demande (axe 4) Efficacité et sobriété énergétique (axe 5) Fermeture du cycle du carbone (axe 6)
		Microcomposants (axe 2) Objets communicants (axe 3) Sécurité, défense, spatial (axe 4) Nanosciences - Chrontronique (axe 5)
		Technologies de l'IA (axe 1) Sécurité des systèmes (axe 2) Concepts d'interopérabilité des systèmes numériques (axe 3) Instrumentation numérique et remodelageur avancé (axe 4)
		Cybersécurité des systèmes industriels pour les activités de défense (axe 1) Cybersécurité des systèmes industriels pour les activités de défense (axe 2) Nouvelles méthodes de caractérisation et outils d'évaluation (axe 3)
		Imagerie médicale (axe 1) Technologies pour la prévention primaire et le diagnostic (axe 2) Innovations thérapeutiques (axe 3) Analyses à grande échelle (axe 4)
Socle de recherche fondamentale	Technologies pour la médecine du futur	Biologie fondamentale et santé (axe 1) Biologie fondamentale et transition énergétique (axe 2) Innovations méthodologiques pour la biologie fondamentale (axe 3)
		Climat et environnement (axe 1) Physique et rayonnement (axe 2) Astrophysique (axe 3) Astronomie (axe 4) Accélérateurs et cryotechnologies (axe 5) Modélisation et outils pour la recherche fondamentale (axe 6)
	Fusion nucléaire	Fusion nucléaire TGR - Titre 3 TGR - Titre 6 TSGC
	TGR	
	Enseignement supérieur et formation	Enseignement supérieur et formation
	Activités civiles au profit de la défense	Programme civils au profit de la Défense (axe 1) R&D NRC (axe 2) Activités transversales (axe 3) Calcul haute performance (axe 4) Démantèlement Reprise et reconditionnement des déchets Gestion des combustibles usés Gestion des déchets - outoirs futur (GIGEO et FAVI) Exploitation des installations de service Investissements et rénovation des installations de service Investissements spécifiques pour les besoins du DEM et de la RCD Transports et emballages Soutien pour l'ARAD Soutien pour l'ARAF
	Assainissement-Démantèlement	Assainissement-Démantèlement
Soutien général et patrimoine	Comptes centraux et fonds d'intervention	Comptes centraux et fonds d'intervention
	Coûts de structure	Logistique opérationnelle Logistique technique
	Patrimoine	Entretien patrimoine Investissement patrimoine
	DDCG DSND ITER	DDCG DSND ITER
Budgets périphériques (hors budget général)	Représentation filiales	Agence ITER France ITER ITER Approche élargie IRT Nanopolec

[illegible]

Mission Numérique

RAPPORT DE SYNTHÈSE

Pascale BAYLE GUILLEMAUD
Stéphane SIEBERT

avril 2021

