

Question d'avenir

Quand interroger le numérique devient fondamental

**COMMENT BÂTIR
UNE INTELLIGENCE
ARTIFICIELLE
DE LA CONFIANCE ?**

**QUEL IMPACT
DU NUMÉRIQUE
DANS LA SANTÉ
DE DEMAIN ?**

**QUEL MONDE
INVISIBLE DERRIÈRE
L'INTERNET
DES OBJETS ?**

**LA CYBERSÉCURITÉ
N'EST-ELLE
QU'UNE QUESTION
DE DÉFENSE ?**

**QU'EST-CE QUE
LE QUANTIQUE
VA CHANGER À
L'ORDRE MONDIAL ?**

A person in a blue shirt and dark pants stands on a tall, narrow black ladder. The ladder is positioned vertically, reaching up to a circular hole in a light-colored, textured wall. The person is looking through the hole with binoculars. The hole reveals a clear blue sky. The overall scene is a metaphor for looking into the future or a hidden world.

Inria

SOMMAIRE

01

COMMENT BÂTIR UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DE LA CONFIANCE ?

Décryptage et revue 2021
P. 4



ÉDITORIAL BRUNO SPORTISSE

Président-directeur général d'Inria
P. 2

POLITIQUE DE SITE

Inria et ses implantations
P. 3



02

QUEL IMPACT DU NUMÉRIQUE DANS LA SANTÉ DE DEMAIN ?

Décryptage et revue 2021
P. 10

03

QUEL MONDE INVISIBLE DERRIÈRE L'INTERNET DES OBJETS ?

Décryptage et revue 2021
P. 16

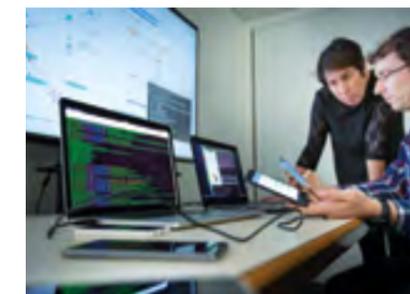


RENCONTRE AVEC PHILIPPE DURANCE, ÉCONOMISTE

Le temps de la prospective
P. 34

BILAN FINANCIER

P. 36



04

LA CYBERSÉCURITÉ N'EST-ELLE QU'UNE QUESTION DE DÉFENSE ?

Décryptage et revue 2021
P. 22

05

QU'EST-CE QUE LE QUANTIQUE VA CHANGER À L'ORDRE MONDIAL ?

Décryptage et revue 2021
P. 28



BRUNO SPORTISSE

PRÉSIDENT-DIRECTEUR GÉNÉRAL D'INRIA

DANS UNE ÉPOQUE OÙ LE NUMÉRIQUE TIENT UNE PLACE OMNIPRÉSENTE, OÙ SE CÔTOIENT, PARFOIS DE MANIÈRE INDISSOCIABLE, LES OPPORTUNITÉS ET LES RISQUES, OÙ TOUS LES DOMAINES DE LA SOCIÉTÉ SONT SUSCEPTIBLES D'ÊTRE TRANSFORMÉS, QUEL RÔLE ENTEND JOUER INRIA ?



Celui d'être à l'avant-garde de la recherche et de l'innovation dans et par le numérique, porté par l'exigence d'impact scientifique, technologique, industriel et sociétal de ses projets.

Celui d'avoir une vision audacieuse et créative de la recherche et de l'innovation. C'est dans ce sens qu'il nous appartient d'être moteur dans les domaines stratégiques pour la souveraineté numérique, de relever les nombreux défis scientifiques actuels, de savoir anticiper les prochains, de produire des connaissances au meilleur niveau pouvant y répondre, avec toujours pour ambition l'impact, quelle que soit sa forme. Et il nous appartient aussi d'être acteur des ruptures technologiques, avec nos partenaires publics et privés, et de susciter et d'accompagner l'innovation. Pour cela, il nous faut être agiles, ouverts à l'évolution de nos méthodes de travail, en capacité de dépasser les modèles existants car notre environnement évolue très rapidement et notre champ d'action doit être au plus haut niveau mondial.

Inria se pense et se vit comme un institut plateforme, ouvert aux échanges, aux interfaces, en capacité de transformer en atout la complexité des écosystèmes du numérique, académiques, industriels et entrepreneuriaux, à même d'attirer et de

À l'avant-garde,
Inria est
la plateforme
publique
de recherche
pour la puissance
numérique
de la France.

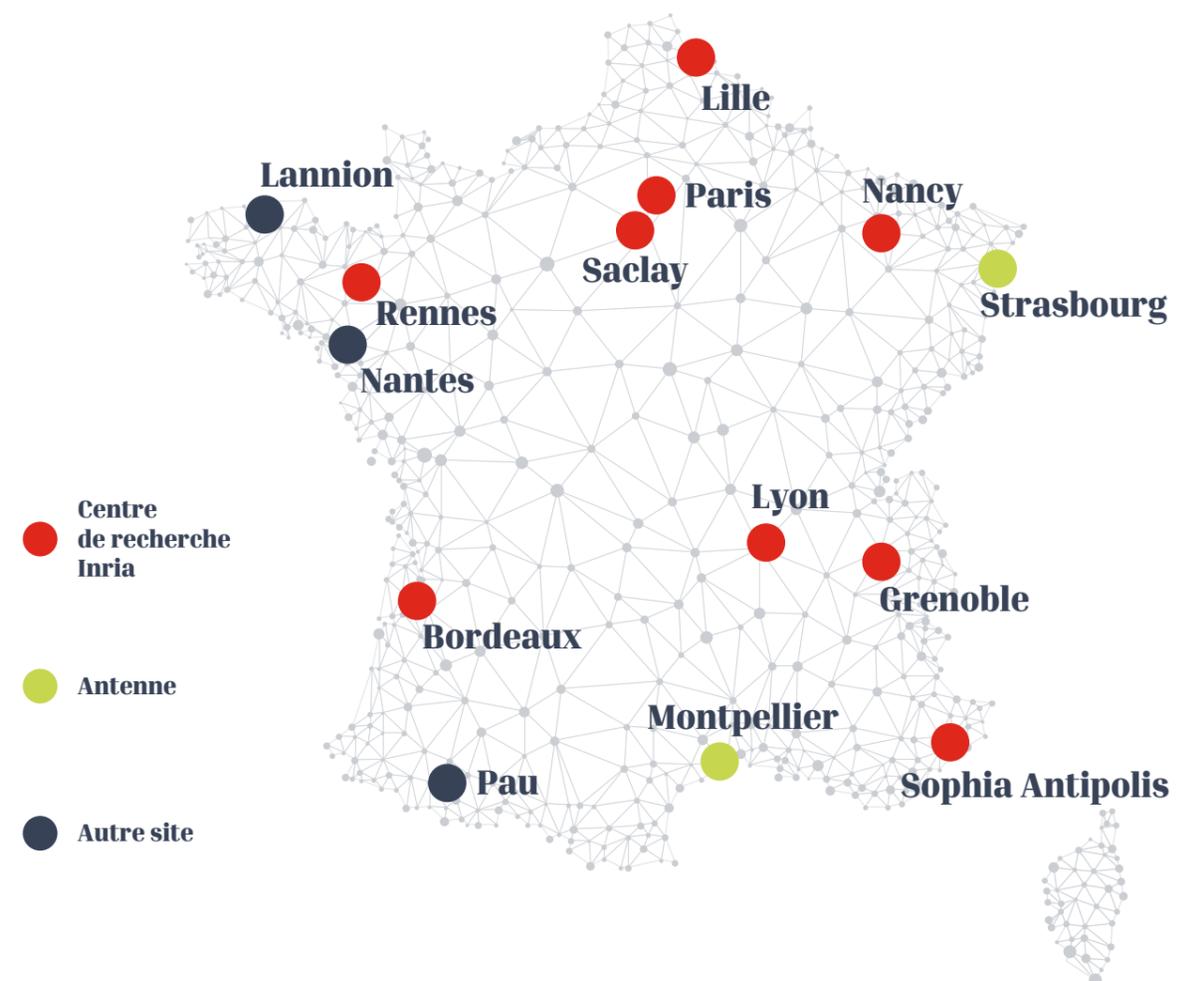
Avoir toujours en ligne de mire :
l'impact, l'utilité de nos découvertes
aux acteurs publics et privés,
et, bien évidemment, aux citoyens.

conjuguer les talents et de faire converger les énergies en France et en Europe. Un institut au plus niveau scientifique, c'est une exigence. Un institut capable de mener de bout en bout des projets technologiques pour répondre à nos grands défis, avec une vision moderne de l'innovation, non linéaire et en sortant des silos. Nos projets scientifiques, intégrés au cœur des grands pôles universitaires, stimulent des partenariats féconds, avec des acteurs académiques et avec des entreprises, des grands groupes ou des ETI, et sont aussi le creuset de startups technologiques.

Résolument en appui aux politiques publiques, notre institut prend toute la mesure de ses devoirs, aussi dans les domaines du développement des compétences, de la diffusion des savoirs et du renforcement du dialogue entre sciences, technologies et société pour et avec le numérique. Parce que la maîtrise de notre destin numérique passe par une pleine conscience des enjeux. Parce qu'il faut « donner un sens au numérique », comme l'ambitionne notre Fondation, pour construire une société numérique de la confiance et de l'innovation, au service de l'humain.

À l'avant-garde, Inria est la plateforme publique de recherche pour la puissance numérique de la France.

POLITIQUE DE SITE Inria et ses implantations

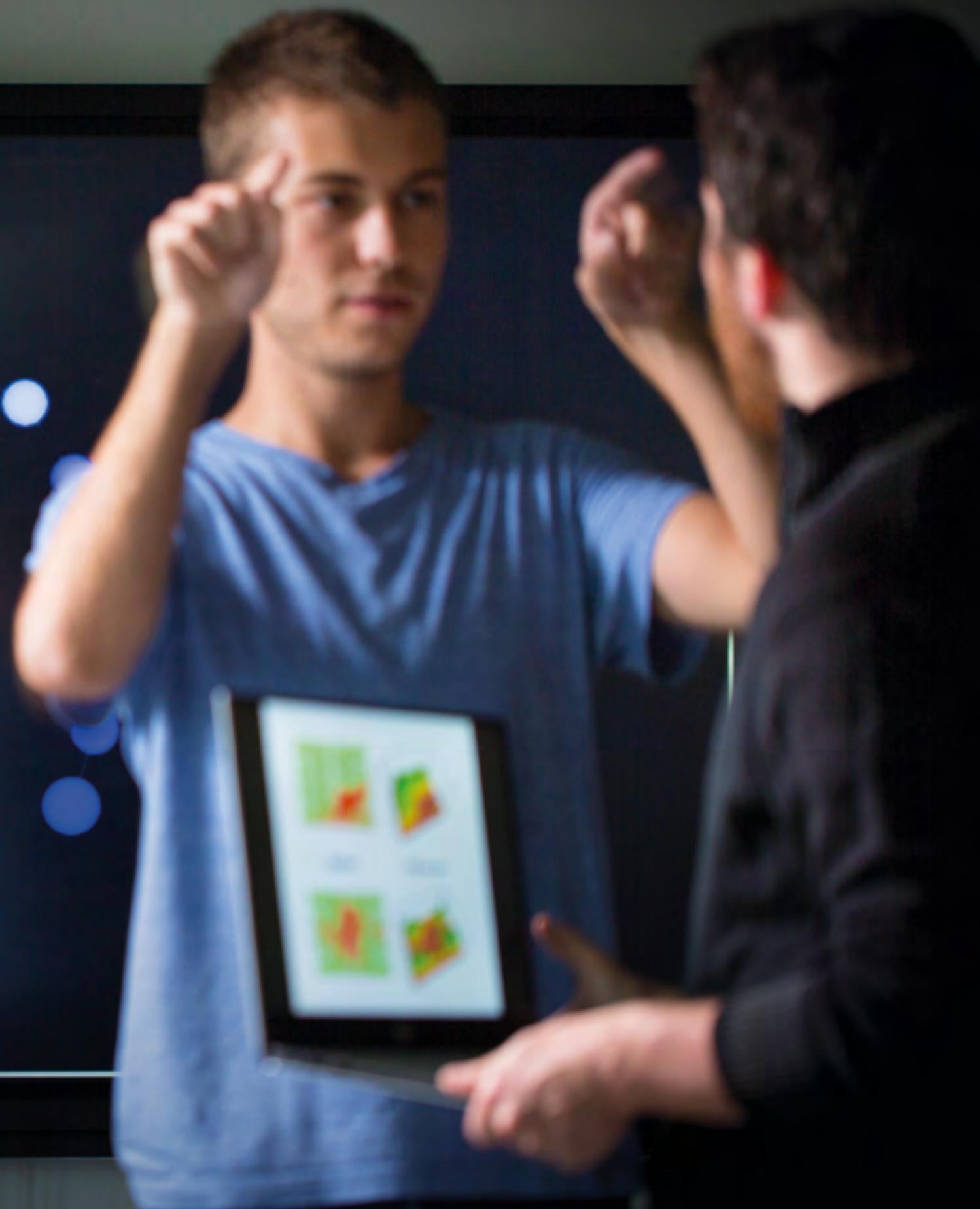


INRIA S'ENGAGE POUR LA CONSTRUCTION DES CAMPUS UNIVERSITAIRES DE DEMAIN

Depuis les premières lois d'autonomie des universités, la volonté politique de l'État est de faire émerger des sites universitaires français de recherche de rang mondial. L'objectif est de relever le défi de la concurrence des grands campus internationaux, en renforçant leur attractivité, leur leadership et leur impact scientifique, technologique et industriel. Inria s'inscrit pleinement dans cette stratégie nationale et s'engage sans ambiguïté à renforcer les écosystèmes des grands sites universitaires dans et par le numérique. Ce nouveau positionnement a été officialisé par la signature d'un premier partenariat stratégique entre Inria et Sorbonne Université en juillet 2021.

Cinq autres partenariats ont été conclus au second semestre 2021 avec respectivement l'université Côte d'Azur, l'université de Bordeaux, l'Institut Polytechnique de Paris, l'université Paris-Saclay et les universités de Lille et de Rennes 1 début 2022. Ces accords d'un genre nouveau annoncent la création des centres Inria des universités afférentes dans lesquels l'institut propose d'opérer ses dispositifs de recherche et d'innovation pour le compte de ses partenaires. Il réaffirme ainsi la force de son modèle d'organisation et de sa stratégie d'impact en articulation fluide avec les modèles des partenaires, au bénéfice de l'ensemble des acteurs de ces sites.

Comment bâtir une intelligence artificielle de la confiance ?



À L'AVANT-GARDE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

COMMENT BÂTIR UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DE LA CONFIANCE ?

DÉCRYPTAGE

« Pourquoi le travail en IA doit-il être centré sur l'humain ? »

QU'EST-CE QUE L'IA ?

Faire reproduire à des machines des activités ou des comportements que les humains perçoivent comme intelligents, comme apprendre, déduire, imaginer, lire ou parler. Les avancées récentes fourmillent, mais quels sont les défis en termes scientifiques, politiques, éthiques de l'IA de demain ? Renaud Vedel, Coordonnateur de la Stratégie nationale pour l'IA, et Fabien Gandon, directeur de recherche Inria, nous répondent.

QUELS SONT LES CHAMPS STRATÉGIQUES DE L'IA POUR L'ÉTAT ?

R.V. : Comme pour toutes les technologies, l'enjeu principal est de rester à la pointe. Si l'hypothèse de l'IA comme technologie d'usage général se vérifie, les politiques publiques doivent favoriser l'émergence d'un écosystème national puissant.

L'IA est une dynamique qui change les outils de découverte scientifique et les modes de production économique : dans la conception des biens industriels et des services, dans l'optimisation des *process* et de l'économie circulaire, dans la relation clients... Bref, dans toutes les verticales métiers et support des entreprises. **Par ailleurs, l'IA joue un rôle croissant dans les fonctions régaliennes comme la défense et intègre les systèmes d'armes, devenant un véritable objet géopolitique.** L'IA est d'ailleurs le terrain choisi par la Chine pour affirmer ses ambitions de puissance et contester la suprématie américaine. L'Europe doit aussi s'inquiéter de son propre positionnement technologique.

QUELS SONT LES ENJEUX ÉMERGENTS DE L'IA ?

F.G. : Je citerais comme premier enjeu la nécessité de lever les sens uniques qui existent entre ces techniques et leurs utilisateurs. Par exemple, obtenir et

interroger des explications compréhensibles et adaptées à un utilisateur est un premier enjeu majeur. Les questions soulevées par l'établissement de la confiance qui demandent notamment d'être capables de généraliser les méthodes et leurs performances, d'assurer leur robustesse, leur vérification, de détecter et corriger des biais, de sécuriser les données, et d'intégrer des mécanismes permettant la contestation et la correction par les utilisateurs, en forment un deuxième. Et il y en a encore beaucoup d'autres, comme la frugalité et la diffusion des méthodes d'IA embarquée dans de multiples objets aux architectures, capacités et environnements logiciels très hétérogènes.

À court terme, nous risquons moins la suprématie d'une IA qu'une amplification aveugle des biais sociaux ou un renforcement irrfléchi des comportements individuels par une gouvernamentalité algorithmique à œillères. Le travail en IA,

dès ses premières étapes de formulation, doit être centré sur l'humain. Pour établir la confiance en IA, il est nécessaire qu'elle ait une fin éthique et qu'elle soit techniquement robuste et auditable sous peine de sanctions. Apporter des réponses à ces enjeux suppose donc aussi de se doter d'un projet social, politique, moral, en regard des projets scientifiques que nous développons.

QUELLE EST LA RESPONSABILITÉ DE L'ÉTAT DANS UN MONDE OÙ SE DÉVELOPPE UNE IA DE PLUS EN PLUS AUTONOME ?

R.V. : L'État doit faire en sorte que la vie collective respecte des normes dans lesquelles la technologie est au service de l'autonomie des citoyens et du bon fonctionnement des institutions, tout en préservant autant que possible la liberté d'entreprendre et d'innover. La responsabilité première est d'éviter toute gouvernance algorithmique déshumanisante, et donc de comprendre les technologies et de les encadrer par une régulation assurant que les technologies restent socialement utiles et positives. On voit bien que certaines familles de l'IA, comme l'apprentissage automatique, ont une nature statistique, et échappent aux méthodes classiques de validation et vérification formelles qui existaient jusqu'à présent. Construire la nécessaire régulation n'est pas simple sans reculer sur l'usage de ces technologies. L'Europe vient de s'engager de manière pionnière dans ce domaine avec le règlement sur l'IA proposé par la Commission européenne en avril 2021. Une deuxième responsabilité majeure de l'État est de construire l'infrastructure d'éducation et de formation de toutes les parties prenantes de la création et de l'usage des systèmes d'IA, intégrant tous leurs enjeux. **Il faut former une nouvelle génération de développeurs, mais aussi des utilisateurs éclairés et donc des citoyens éclairés.** Enfin, se pose la question de la souveraineté,



FABIEN GANDON
DIRECTEUR
DE RECHERCHE INRIA



RENAUD VEDEL
COORDONNATEUR
DE LA STRATÉGIE
NATIONALE POUR L'IA

L'Europe doit accélérer la recréation d'une souveraineté technologique ouverte !

et tout particulièrement de la maîtrise de ses propres données - qu'il s'agisse de la vie privée, du secret des affaires, du secret industriel. C'est la capacité à soutenir un rapport de force avec de grands groupes internationaux qui ne doivent pas imposer leurs clauses sur des sujets de normes politiques démocratiques. Il faut le faire sans hargne mais avec détermination,

et préserver des espaces collectifs de coconstruction globale comme l'OCDE, le W3C ou les enceintes de normalisation.

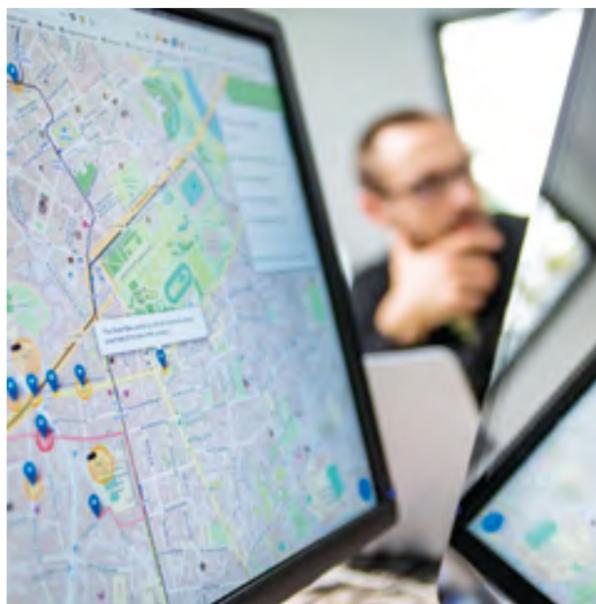
COMMENT PEUT-ON RÉPONDRE À CES BESOINS ET TROUVER UN ÉQUILIBRE ENTRE LES NÉCESSITÉS DE RÉGULATION ET CELLES D'OUVERTURE ?

F.G. : Vaste question, mais je pense immédiatement à deux outils internationaux pour contribuer à la régulation et à l'ouverture : la standardisation et l'*open source* : la standardisation ne connaît pas de frontières, il est donc important de surveiller et participer aux standards, qu'ils concernent la donnée ou tout autre aspect logiciel et matériel. Les standards internationaux doivent faire l'objet non seulement d'une veille mais aussi d'une participation active. L'*open source* et le logiciel libre apportent aussi une possibilité de transparence intéressante : on met à la disposition de la communauté des éléments de solution pouvant être utilisés à l'échelle de l'individu, de la commune, de l'entreprise, de l'Europe ou du monde !

COMMENT BÂTIR UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DE LA CONFIANCE ?

REVUE

2021



◀ TRANSPARENCE

VERS UNE RÉGULATION DES ALGORITHMES

Les algorithmes sont partout ou presque : de la recommandation de publicité au calcul des impôts, en passant par les moteurs de recherche. Ils orientent de plus en plus nos choix en termes culturels ou économiques, faisant évoluer rapidement les usages et notre dépendance à ceux-ci. Mais l'arrivée massive de techniques d'IA peut les rendre si complexes que leur utilisation et leur fonctionnement en deviennent opaques. Dès lors, comment s'assurer qu'ils ne sont pas sources d'injustices, de biais, ou de fraude ? S'en prémunir, c'est toute l'ambition du **projet-pilote Regalia**, porté par Benoît Rottembourg, en partenariat avec le Pôle d'expertise de la régulation numérique (PEReN). Il vise notamment à **créer des outils de régulation, pour aider, ou obliger, les acteurs publics et privés à améliorer la transparence de leurs algorithmes et à rendre l'usage de l'IA plus responsable.**

GPAI

▼

L'IA au service des droits humains



La Mission-IA d'Inria, dirigée par Isabelle Herlin, fut cette année en charge de la coordination du GPAI (Global Partnership on Artificial Intelligence, PMIA en français). Ce dernier tend à favoriser le développement responsable de l'IA fondée sur les principes de droits de l'Homme, d'inclusion, de diversité, d'innovation et de croissance économique. Lancé en juin 2020, le GPAI est une initiative internationale et multipartite, qui rassemble aujourd'hui 25 pays membres avec pour finalité de combler le fossé entre la théorie et la pratique des usages de l'IA en soutenant des recherches-actions afin d'éclairer

les politiques publiques. Elle réunit des experts de premier plan venus de la science, de l'industrie, de la société civile, des organisations internationales et des gouvernements. Le sommet annuel du GPAI, piloté par Inria en 2021, a eu lieu les 11 et 12 novembre à Paris. Au centre du sommet : une réflexion sur l'IA de demain au sein de la communauté internationale. Les travaux ont été menés au sein de quatre groupes de travail traitant de l'IA responsable - avec un sous-groupe sur l'IA et la réponse à la pandémie -, de la gouvernance des données, de l'avenir du travail, et de l'innovation et la commercialisation.

LAB IA

▶

Comment accélérer la transformation numérique de l'État avec l'IA ?

Pour accompagner la transformation numérique des administrations, il faut disposer d'outils capables de répondre aux besoins des agents et des usagers. Pour cela, il y a le *Lab IA* ! Un dispositif qui regroupe Inria, la direction interministérielle du numérique et la direction interministérielle de transformation de l'action publique. Il recueille et sélectionne les demandes des administrations en matière de numérique et d'IA et trouve les entreprises ou les équipes de recherche capables d'y répondre. Le résultat des projets donnera lieu le plus souvent à des preuves de concept en *open source* que tout le monde pourra utiliser.



▶ STARTUPS

L'IA au service de l'imagerie médicale

Et si l'IA pouvait aider à mieux détecter des régions suspectes dans les données d'imagerie cérébrale ? C'est à partir de cette question, traitée dans le cadre d'un postdoc au sein de l'équipe-projet Statify, que sont nées la startup Pixyl et sa solution : Pixyl.Neuro. Celle-ci permet d'analyser l'imagerie cérébrale, d'y repérer les anomalies et de fournir immédiatement au radiologue des informations l'aidant à adapter le traitement proposé au patient ou à confirmer son diagnostic. Pixyl.Neuro est déjà opérationnelle pour le suivi de maladies neuro-inflammatoires ou les maladies neurodégénératives... et continue à se perfectionner.

■ PROJET TRUST-AI

UNE QUESTION DE CONFIANCE

Les modèles d'intelligence artificielle, souvent qualifiés de « boîtes noires », sont connus pour leur efficacité. Cependant, le manque de transparence lié à leur mode de fonctionnement peut susciter du scepticisme ou de la défiance chez les utilisateurs. Lorsque l'IA influence une décision médicale, les professionnels de santé, ainsi que les patients concernés, doivent pouvoir comprendre le cheminement des

algorithmes ayant influencé la décision, tant pour être rassurés que pour prévoir d'éventuelles actions pour changer le cours des choses. C'est dans ce contexte que le projet européen TRUST-AI a vu le jour : en s'appuyant sur les sciences cognitives et la programmation génétique, qui permettent de mieux comprendre et interpréter les choix faits par un algorithme, le projet vise à créer une plate-forme d'IA collaborative fiable.

LA RÉVOLUTION DEEPOOMATIC : ADAPTER LA RECONNAISSANCE D'IMAGE AUX MÉTIERS

Sur le terrain, les besoins en reconnaissance d'image sont à peu près aussi variés que les métiers qui y font appel. C'est pourquoi la startup Deepomatic, une entreprise née au sein du centre Inria de Paris en 2014, développe une plate-forme d'intelligence artificielle déployée en mode SaaS (Software as a Service) entièrement personnalisable : elle permet à ses clients de concevoir et déployer leur propre solution de reconnaissance d'image en fonction de leurs besoins. Une idée qui rencontre un franc succès : une vingtaine d'entreprises font déjà appel à Deepomatic, dont de grands comptes tels que Suez, Bouygues Telecom ou Sanofi. Et cette liste, ainsi que celle des cas d'usage, continue de s'allonger.



Quel impact du numérique dans la santé de demain ?

QUEL IMPACT DU NUMÉRIQUE DANS LA SANTÉ DE DEMAIN ?

DÉCRYPTAGE

« Comment le numérique peut-il aider les médecins ? »

HUGUES BERRY
ADJOINT AU DIRECTEUR
SCIENTIFIQUE, EN CHARGE
DE LA BIOLOGIE ET
DE LA SANTÉ NUMÉRIQUE
CHEZ INRIA



AIDE AU DIAGNOSTIC, ANALYSE D'EXAMENS, OPTIMISATION ET PERSONNALISATION DES TRAITEMENTS...

Depuis une quinzaine d'années, l'application des sciences du numérique à des données médicales complexes révolutionne le traitement des données de santé, promettant des bénéfices multiples pour les patients. Hugues Berry, adjoint au directeur scientifique, en charge de la biologie et de la santé numérique chez Inria, nous parle des défis de demain en la matière.

QUELS SONT LES ENJEUX DE LA SANTÉ NUMÉRIQUE ?

La santé numérique concerne les professionnels utilisant le numérique comme outil de la recherche médicale, mais également les chercheurs en sciences du numérique qui se consacrent aux problèmes biologiques et développent des outils spécifiques pour la santé.

Les principales promesses de la santé numérique sont l'assistance aux médecins en termes de diagnostic de la maladie, du pronostic de son évolution, et de choix thérapeutiques. Pour le cancer par exemple, plusieurs traitements sont souvent possibles : le numérique peut aider le médecin à choisir entre chirurgie, immunothérapie et chimiothérapie, ou décider de les combiner. Un autre volet concerne la santé publique : le numérique permet de repérer des signes de nouvelles maladies, d'épidémies, ou d'analyser leur progression. Il permet aussi, par exemple, d'estimer plus finement les effets secondaires des traitements dans la population par l'analyse d'une taille plus importante de données.

QUELS SONT LES GRANDS DÉFIS DE LA SANTÉ NUMÉRIQUE ?

Les professionnels de la santé ont besoin de récolter des données pléthoriques avec peu d'erreurs, ce qui nécessite de grosses infrastructures. La recherche en numérique peut fournir de nouvelles méthodes efficaces, même avec des données moins massives, moins « propres » et dont on peut expliquer le fonctionnement.

Parmi les défis pour nos chercheurs, les modèles multi-échelles vont devenir clés. Nous commençons à savoir simuler un système sur une échelle donnée : nous pouvons simuler en partie une cellule du cœur, ou les propriétés de contraction de l'organe entier, ou encore l'évolution du patient dans les vingt ans à venir selon son mode de vie. Mais on ne sait pas faire des modèles personnalisés qui incorporent toutes ces échelles (molécule, cellule, organe, comportement). Pour l'imagerie du cerveau du patient, mais ne savons pas encore bien comment coupler leur analyse avec d'autres données (génétiques, mode de vie). Nous y travaillons pour pouvoir faire, notamment, des prédictions personnalisées plus précises et efficaces. Les travaux sur le jumeau numérique ont besoin de cette capacité multi-échelle. Un autre grand défi est celui des essais cliniques que les contraintes méthodologiques rendent très lourds à mettre en œuvre correctement, comme on l'a vu avec le Covid. La création de méthodologies numériques spécifiques pourrait faciliter leur mise en œuvre, par exemple en les complétant avec des données extérieures ou en personnalisant le traitement en cours d'essai.

LA NUMÉRISATION

LA SANTÉ NUMÉRIQUE SELON ALEXANDRE MEBAZAA

Les besoins numériques, en médecine, sont énormes. La crise récente du Covid est représentative de la gestion de la santé et de la recherche en santé depuis Pasteur : la santé est un trinôme maladie/dysfonctionnement/médicament. Ce trinôme s'est développé dans chaque spécialité qui a progressé en silo. On arrive à la limite de cette structuration à cause de la complexité grandissante des malades qui vivent de plus en plus longtemps avec plusieurs pathologies qui s'aggravent les unes les autres. La numérisation peut nous aider à appréhender les complexités du malade, de la maladie, du traitement, tout en simplifiant le travail des professionnels de santé.

L'un des enjeux de nos recherches est la prise en charge des malades aigus, qui ont été opérés et dont les éventuelles complications n'ont pas été prévues. Aujourd'hui, un malade faisant un séjour à l'hôpital pour une chirurgie est traité par plusieurs services qui produisent des données différentes du patient. Toutes ces données disparaissent quand le patient change de service. Le malade rentre chez lui et subit

parfois des complications. Un de nos projets est de recueillir toutes les données collectées pendant un séjour à l'hôpital, faire travailler des logiciels d'apprentissage, et permettre d'émettre un pronostic à la sortie du patient sur les risques de complication. C'est un enjeu humain important de pouvoir rassurer, recommander, et surtout suivre sur un plus long cours. L'équipe commune Inria-APHP travaille sur la collecte, l'analyse et le croisement de ces données. Il y a douze millions de malades opérés par an en France. Pouvoir prévenir leurs complications et les suivre au long cours serait un gain révolutionnaire pour le malade qui retrouverait une belle qualité de vie après toute chirurgie et permettrait de générer de grandes économies. La santé numérique fait enfin évoluer le travail de recherche en médecine. Les grands chercheurs traditionnels en médecine ont découvert les maladies, leurs causes, leurs traitements. Aujourd'hui, on essaye de prendre le problème autrement par l'analyse et le croisement des données : d'autres voies de recherche, basées sur la statistique notamment, sont en éclosion.



ALEXANDRE MEBAZAA
PROFESSEUR DE MÉDECINE
À L'UNIVERSITÉ DE PARIS,
CHEF DU SERVICE D'ANESTHÉSIE
ET DE RÉANIMATION
DE L'HÔPITAL LARIBOISIÈRE

L'INSERM, L'APHP et INRIA

L'équipe commune Inserm-Inria, COMPO, est intégrée au centre de cancérologie de Marseille. Elle utilise les mathématiques pour optimiser les traitements différents : comment les combiner ? Les doser ? Les alterner ? Avec plusieurs objectifs : une efficacité accrue, une diminution des effets secondaires, et donc une meilleure prise en charge des malades.

L'équipe HeKA avec l'Inserm et l'APHP crée des outils numériques de phénotypage qui aident à la personnalisation du pronostic et à la prise en charge des maladies rares. L'un des outils de l'équipe permet de caractériser le parcours hospitalier du patient en regroupant les parcours similaires. L'équipe travaille aussi sur la fouille de données dans les textes hospitaliers. Le traitement automatique du langage permet d'extraire automatiquement les concepts médicaux dans ces comptes-rendus, une étape indispensable à leur analyse automatique.

QUEL IMPACT DU NUMÉRIQUE DANS LA SANTÉ DE DEMAIN ?

REVUE

2021

E-SANTÉ

UNE ÉQUIPE INRIA – INSERM AU PLUS PRÈS DES PATIENTS

L'équipe-projet HeKA, créée par Inria et l'Inserm, et associée à l'APHP s'est installée à ParisSantéCampus, dont l'inauguration a eu lieu en décembre 2021. Elle pourra ainsi travailler au contact quotidien de médecins hospitalo-universitaires, d'associations de patients, de startups, d'industriels de la santé ; une dynamique qui favorisera l'émergence de projets de recherche communs.

HeKA, créée en 2021, développe des modèles et des outils d'aide à la décision médicale. **Ils facilitent le diagnostic et le pronostic des patients, ou enrichissent les essais cliniques (données de soins, connaissances scientifiques) pour accélérer l'accès à des molécules innovantes.**

HeKA étudie notamment le cancer et plusieurs maladies pédiatriques rares.



ESSAIS CLINIQUES

La simulation numérique, c'est bon pour le cœur

Inria coordonne depuis début 2021 le projet européen SimCardioTest, auquel participent dix partenaires issus de six pays. Leur mission : démontrer la faisabilité, l'efficacité et les avantages des essais cliniques *in silico* (c'est-à-dire basés sur la simulation numérique) pour les dispositifs médicaux et médicaments visant les pathologies cardiaques.

Les enjeux sont considérables. Si la voie *in silico* se montre fiable, les essais cliniques sur les animaux deviendront moins fréquents et ceux réalisés sur l'Homme pourront être plus courts et plus sûrs. En conséquence, il sera moins long et moins coûteux de développer et de mettre sur le marché des nouveaux dispositifs ou des nouveaux médicaments. SimCardioTest a aussi pour objectif de renforcer la confiance des patients, des soignants et des autorités de régulation dans l'innovation en santé. Il exploitera des données médicales anonymisées.



MODÉLISATION VISUALISER LA NEURODÉGÉNÉRESCENCE POUR MIEUX LA COMBATTRE

Stanley Durrleman, Prix Inria-Académie des sciences du jeune chercheur en 2020, est responsable de l'équipe-projet Aramis intégrée à l'Institut du Cerveau et de la moelle épinière (ICM). Il mène des travaux de modélisation et d'apprentissage statistique sur les pathologies neurodégénératives.

Ses objectifs : détecter des signes précurseurs des maladies, comprendre les transformations du cerveau qu'elles provoquent, prédire l'évolution à trois ou quatre ans. Et, à long terme, mieux caractériser l'évolution individuelle des patients pour mieux cibler les essais thérapeutiques.

COVID-19 COMMENT ANTICIPER D'AUTRES ÉPIDÉMIES ?

Inria et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) conçoivent un simulateur très détaillé de la propagation d'épidémie adapté au Covid-19. Il modélise une ville réelle, sa population, ses déplacements, et compare divers scénarios de couverture vaccinale, de taux de télétravail, de limitation d'horaires des commerces, etc. Par la suite, cette flexibilité lui permettra de créer un modèle pour simuler d'autres épidémies. Le projet ICI a été lancé dans le cadre de la Mission Inria Covid-19.

CANCER DU FOIE

Une chirurgie encore plus précise

Pour un chirurgien, enlever une tumeur hépatique est un défi : le foie est un organe mou et déformable, et les imageries réalisées avant l'intervention ne ressemblent pas toujours à ce que le praticien découvre quand il opère et déforme partiellement l'organe. Dans le cadre du projet européen Hipernav, quatorze partenaires dont Inria ont posé les bases d'un modèle virtuel précis du foie, alimenté par des images prises avant et pendant la chirurgie. Il facilitera la « navigation » dans l'organe, un peu à la manière d'un GPS, raccourcira la durée des opérations et permettra des ablations de tumeurs précises et complètes.

MALADIES GÉNÉTIQUES

DES JUMEUX NUMÉRIQUES DE CELLULES VIVANTES

Les biologistes connaissent les états sains et pathologiques des cellules qu'ils étudient. Mais ils ne comprennent pas en détail les mécanismes qui entrent en jeu quand survient une maladie génétique. La startup Vidium, soutenue par Inria, leur fournit un nouvel outil : des jumeaux numériques de cellules vivantes, autrement dit des modèles numériques de leur

fonctionnement moléculaire interne. Basés sur des données biologiques réelles, ils décrivent les cellules avec un degré élevé de complexité et cherchent à prédire leur évolution en fonction de différentes mutations. Une solution qui séduit aussi les investisseurs : Vidium a ainsi levé un million d'euros en 2021.





Quel monde invisible derrière l'Internet des objets ?

QUEL MONDE INVISIBLE DERRIÈRE L'INTERNET DES OBJETS ?

DÉCRYPTAGE

QUEL MONDE CONNECTÉ POUR DEMAIN ?

■ LES SONGES D'ALICE (extrait du livre blanc sur l'Internet des objets publié par Inria en décembre 2021)

LE RÊVE D'ALICE

La liberté compte beaucoup pour Alice. Alice peut facilement connecter ses appareils à d'autres équipements intelligents ou à des solutions informatiques distantes qu'elle choisit sur le réseau : ce système constitue pour elle une forme de cocon personnel et cyberphysique qui « amortit » son expérience du réel, qu'elle soit chez elle, sur la route, ou au travail. Pour se rendre à l'usine, Alice utilise un véhicule autonome qui interagit avec les infrastructures de la ville intelligente pour emprunter automatiquement l'itinéraire le moins pollué, ou pour trouver une place de stationnement. Les systèmes avancés de maintenance prédictive et de surveillance en temps réel de l'environnement que l'usine utilise garantissent la sécurité et la productivité du lieu de travail, tout en optimisant les consommations d'énergie. Et plus important que tout : elle garde le contrôle et peut faire confiance à un système qui préserve sa vie privée. Alice

utilise son cocon pour l'aider à prendre soin de sa santé avec un accompagnement prédictif. Elle peut bien sûr choisir de désactiver le système et de supprimer les données enregistrées à tout moment. Si elle le souhaite, Alice peut choisir de partager certaines de ses données de santé avec son médecin. Sans compter qu'elle peut accéder à tous ces services, alors qu'elle vient tout juste de déménager à la campagne !

LE CAUCHEMAR D'ALICE

Le taxi autonome d'Alice a percuté un arbre. La société de taxi expliquera plus tard que sa flotte de véhicules a connu des dysfonctionnements en raison de l'usurpation de signaux GPS. Alice n'a pas été gravement blessée, mais l'accident a endommagé l'un de ses précieux implants connectés. Et comme si cela ne suffisait pas, elle s'est retrouvée contrainte de payer une forte « rançon » à des pirates qui ont exploité une faille de sécurité de l'un de ses implants. Sous la pression de

sa compagnie d'assurance, elle n'a d'autre choix que d'utiliser d'autres appareils surveillant ses signes vitaux, et de voir ses données confidentielles vendues à des tiers. Au travail, elle est constamment épiée par ses superviseurs, qui usent des étonnantes capacités de surveillance des déploiements de l'IoT (Internet des objets), dispositifs qui sont à leur tour victimes de cyberattaques, compromettant la productivité autant que la sécurité. S'appuyant sur une étude pilote, le gouvernement propose une nouvelle politique généralisant l'utilisation obligatoire des capteurs médicaux du cocon numérique, sacrifiant l'intimité de ces données à l'objectif de réduction de la dette publique du pays. Soumise à cette connectivité omniprésente et à la dépendance aux technologies, perdue, prisonnière de son cocon numérique, elle se demande ce qui peut lui rester de sa vie privée, et même de son libre arbitre, dans cette société devenue folle.



Nathalie Mitton

Directrice de recherche Inria en réseau de capteurs sans fil

COMMENTE LES SONGES D'ALICE

Le rêve et le cauchemar d'Alice nous décrivent ce que pourrait être le monde de l'IoT. Mais heureusement, ce n'est pas la réalité, qui se situe entre les deux. Le rêve d'Alice n'est peut-être pas la représentation universelle des usages de l'IoT, mais il illustre l'impact majeur qu'il peut avoir sur notre quotidien, sur nos modes de production, sur les évolutions sociales dans leur ensemble. **L'IoT constitue effectivement un formidable levier pour faciliter notre quotidien en automatisant des tâches domestiques, pour réduire la pénibilité au travail et, à plus large échelle, pour fluidifier les échanges et processus de notre monde moderne.** Le cauchemar d'Alice illustre les points de vigilance à avoir lorsque nous déployons de telles solutions, avec un focus particulier sur la sécurité des systèmes et des personnes, mais également des données dont la compromission représente une menace pour la vie privée des individus et la compétitivité économique. Non, nous ne vivons pas dans ce monde, en grande partie parce que ces points de

vigilance ont été identifiés et, avant de déployer de tels systèmes, des barrières technologiques, politiques et juridiques doivent se mettre en place pour nous protéger de ces dérives. Déployer de tels services requiert également l'acceptation par la société qui, selon les cultures, peut être plus ou moins naturelle. Mais les services à base d'IoT vont beaucoup plus loin que ce que vit Alice. On les retrouve aujourd'hui dans beaucoup d'autres domaines d'application très variés tels que l'agriculture, la gestion des déchets, la domotique, l'usine 4.0, l'appui aux secours, l'entretien des routes et ouvrages d'art, etc. Dans certaines de ces applications, les risques auxquels Alice est confrontée ne sont pas pertinents et les systèmes déployés apportent souvent une réelle plus-value : une meilleure gestion de l'arrosage pour certaines cultures est d'autant plus importante dans des régions arides ; une maintenance préventive de qualité dans l'entretien des ponts et chaussées réduit les interventions et les accidents. La prochaine étape pour un déploiement de systèmes IoT durables, sûrs et responsables :

la mise en place de cadres juridiques et de certifications techniques garantissant la fiabilité des systèmes. **Autre enjeu majeur : la sensibilisation et la formation des différents publics (utilisateurs, fournisseurs de solutions à base d'IoT, collectivités, politiques) aux risques auxquels ils s'exposent (cyberattaques, vol de données personnelles, etc.) mais également à l'équilibre coût/utilité d'une application IoT.**

Prenons l'exemple d'une application IoT pour l'agriculture ayant pour but de mieux préserver notre environnement en adaptant localement la quantité d'eau ou de nitrate nécessaire à une culture, impactant favorablement l'environnement : le bénéfice est évident, mais la production de composants IoT constitués de métaux précieux, leur transport depuis les usines de production, leur recyclage et même l'alimentation des serveurs stockant et exploitant les données qu'ils remontent ont un coût environnemental. C'est un équilibre bénéfique qu'il nous faut trouver.

QUEL MONDE INVISIBLE DERRIÈRE L'INTERNET DES OBJETS ?

REVUE

2021



◀ LIVRE BLANC

Protéger des milliards de nouvelles machines

Ces prochaines années, l'Internet des objets (IoT) et ses milliards de nouvelles machines communicantes vont toucher tous les secteurs de notre vie : habitat, santé, transport, agriculture, usines, espaces urbains et ruraux... Inria publie un livre blanc coordonné par Emmanuel Baccelli, directeur de recherche Inria, sur cette révolution en marche qui défie parfois l'imagination. Car l'Internet des objets, c'est à la fois plus de confort et de services à valeur ajoutée, mais aussi des risques accrus de surveillance des individus ou de vulnérabilité aux cyberattaques. **Le document décrit la trajectoire de l'IoT depuis les premières puces RFID (radio-identification) de la fin des années 1990, et passe en revue ses défis sociétaux, scientifiques et techniques.** Il détaille par ailleurs les 11 domaines de recherche en informatique concernés par cette technologie. Inria est présent sur la totalité d'entre eux.

DEFI INRIA

▼ AMÉLIORER LA SÉCURITÉ ET LA TRANSPARENCE DES OBJETS CONNECTÉS

Une plate-forme logicielle embarquée pour les objets connectés, sans concession ni sur la cybersécurité, ni sur la transparence, ni sur les performances, autrement dit très peu gourmande en énergie et en puissance de calcul ? C'est la grande ambition du système d'exploitation RIOT et du projet d'Inria RIOT-fp. Pour optimiser le fonctionnement des microcontrôleurs, ce projet pionnier mise sur l'amélioration perpétuelle d'un système d'exploitation ultraléger tout en restant généraliste, combinant des bibliothèques de programmes en open source,

alliant des avancées en cryptographie, en réseau sécurisé basse consommation et en vérification formelle. RIOT préfigure la possibilité de disposer d'un « Linux des objets », à la fois sûr, performant, évolutif et peu gourmand en énergie. Le projet RIOT-fp vise à favoriser la longévité du matériel, d'une part en économisant les batteries, et d'autre part en adaptant au fur et à mesure le logiciel IoT déployé sur microcontrôleur, et sa sécurité, dans un contexte complexe où usages, besoins et normes changent très vite.



ORANGE – INRIA On ne change pas une équipe qui gagne

Partenaires de recherche depuis 2015, Orange et Inria renforcent encore leurs liens : ils créent un laboratoire commun consacré au continuum *Cloud to IoT*. Autrement dit, à des clouds qui s'étendraient des plus grands *data centers* jusqu'au plus petits objets connectés, sur de vastes zones géographiques. Au menu des recherches : gestion de ces infrastructures, développement de leurs applications, et expérimentations.



◀ TOUCH SENSITY

Après l'écran tactile, le matériau sensible !

Et si un mur de maison, une prothèse de bras, un tissu de vêtement... devenaient des surfaces sensibles capables de détecter une pression, une extension, une déformation ou un endommagement ? C'est le pari de la startup Touch Sensity créée par l'ancienne ingénieure Inria Anna Pugach et l'entrepreneur Mehdi Elhafed. Leur technologie est robuste, flexible, non invasive. Elle s'inspire de travaux Inria sur un vêtement connecté qui mesure les angles articulaires pour prévenir les troubles musculo-squelettiques.

■ AGRITECH

TAGS RFID : L'AIDE-MÉMOIRE DU VITICULTEUR

Un viticulteur qui parcourt une parcelle de vigne repère des piquets abimés, des sarments à broyer, des feuilles attaquées par une maladie... S'il installe sur ses pieds de vigne les tags RFID (radio-identification) de la startup *AgriBloT* intégrée à l'Inria *Startup Studio*, il pourra y mémoriser ces informations à l'aide d'un lecteur-enregistreur

RFID. Ses ouvriers agricoles les récupéreront de la même façon, sans passer par un réseau télécoms, et sauront où ils doivent intervenir. Ces tags aide-mémoire peuvent stocker d'autres informations : hygrométrie, température, traitements appliqués... De plus, le viticulteur peut rapatrier les données sur son PC.





La cybersécurité n'est-elle qu'une question de défense ?

LA CYBERSÉCURITÉ N'EST-ELLE QU'UNE QUESTION DE DÉFENSE ?

DÉCRYPTAGE

« Comment la recherche publique fait-elle évoluer la sécurité numérique ? »

CYBERSÉCURITÉ : DE QUOI PARLE-T-ON ? QUELLE PLACE POUR LA RECHERCHE PUBLIQUE ?

L'actualité nous rappelle combien l'accélération de la transformation numérique des entreprises et des administrations a placé la cybersécurité au cœur des enjeux. Rappelons tout d'abord que la cybersécurité consiste à assurer trois propriétés de l'information, des services et de l'infrastructure informatique : la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité. Ses enjeux prioritaires sont la protection des infrastructures critiques (qui permettent de produire les biens et d'assurer les services essentiels à la nation) et des nouveaux services numériques qui assurent le fonctionnement et la résilience de notre société (services financiers, logistique, commerce en ligne, vote électronique).

Inria a placé la question de la souveraineté technologique et industrielle du numérique au cœur de sa perspective stratégique : la recherche en cybersécurité a été l'une des priorités de l'institut au cours des quinze dernières années, avec environ 30 équipes travaillant dans ce domaine.

Dans le cadre du Plan *France Relance*, Inria assure avec le CNRS et le CEA le pilotage du PEPR (Programmes et équipements prioritaires de recherche exploratoires) cybersécurité structuré autour de deux axes thématiques : « Sécurité de l'information » et « Sécurité des systèmes ». En outre, Inria assure pour le compte de l'ensemble de la communauté académique la mise en œuvre du Programme de transfert du Campus Cyber par Inria dans le cadre du Campus Cyber et de son réseau en région. D'un montant de 40 millions d'euros sur cinq ans, ce programme a pour objectifs de renforcer les efforts de recherche et de transfert de compétences et de technologies issues de la recherche publique vers l'ensemble des écosystèmes territoriaux de la cybersécurité, et de favoriser les projets conjoints entre acteurs (académiques, industriels, gouvernementaux).



HUBERT DUAULT
RESPONSABLE DU PROGRAMME
CYBERSÉCURITÉ CHEZ INRIA

LUDOVIC MÉ
AJOINT AU DIRECTEUR
SCIENTIFIQUE EN CHARGE DE LA
CYBERSÉCURITÉ CHEZ INRIA



GEOFFROY HERMANN,
RÉFÉRENT POUR LA RECHERCHE
À L'AGENCE NATIONALE
DE LA SÉCURITÉ DES SYSTÈMES
D'INFORMATION (ANSSI)



Geoffroy Hermann et Ludovic Mé nous dévoilent les enjeux scientifiques du partenariat entre l'ANSSI et Inria.

QUELLES SONT LES THÉMATIQUES PRIORITAIRES POUR L'ANSSI ET INRIA EN CYBERSÉCURITÉ ?

G.H. : Les thématiques d'intérêt et la démarche collaborative associée sont le fruit de réflexions conjointes entre l'ANSSI et Inria qui ont impliqué nos équipes entre 2019 et 2021. Nous avons ainsi identifié une liste de thématiques de recherche pour des coopérations potentielles ainsi que les divers modes de collaboration envisageables (thèses, défis communs, etc.).

Les échanges actuels entre nos équipes portent sur un sous-ensemble de ces thématiques qui correspondent à nos priorités pour 2022.

Nous souhaitons faire un effort particulier sur les assistants et outils de preuve, qui permettent d'automatiser la preuve de propriétés, et sont donc utilisés en sécurité, par exemple pour montrer que tel ou tel programme n'engendrent pas de fuite d'information. Ces outils sont complexes et le niveau d'expertise nécessaire à leur utilisation est élevé. Cela justifie donc notre collaboration autour des questions suivantes : comment avoir une vision complète des questions de sécurité grâce à ces outils ? Comment mieux appréhender et utiliser ces outils ?

Autre enjeu actuel : la cryptographie « appliquée », notamment sa mise en œuvre dans le cadre de l'Internet des objets. Ici, c'est l'augmentation considérable de la surface d'attaque que va engendrer le déploiement massif d'objets qui justifie notre engagement sur ce thème.

L.M. : Par ailleurs, nous souhaitons avancer sur la création de processeurs sécurisés exploitant l'architecture ouverte RISC-V, car même si on parvient au niveau logiciel à une sécurité bien meilleure que celle d'aujourd'hui, si ce logiciel s'exécute sur une plate-forme non maîtrisée et présentant des failles, la protection reste inefficace. Une première thèse s'intégrant à

cette thématique a ainsi déjà démarré. Elle a permis le développement d'un mécanisme pour protéger l'adresse de retour stockée d'une procédure, par exemple contre une attaque dite « par débordement » et, surtout, la définition formelle des propriétés de sécurité qui lui sont liées.

Enfin, la supervision de sécurité et la détection d'intrusion sont également au cœur de nos échanges. En effet, face à l'insuffisance démontrée quasi quotidiennement de la pure protection, il est nécessaire de surveiller les systèmes d'information pour y détecter, idéalement en temps réel, les attaques les ciblant.

Il faut noter enfin que des thèmes connexes, comme l'IA de confiance, s'intègrent aussi à nos sujets de coopération, par exemple via la thématique de la supervision de sécurité. En effet, le machine learning est aujourd'hui une des techniques très fréquemment utilisées dans ce domaine, même si les résultats obtenus sont encore à améliorer notablement, et il se pose évidemment la question de la confiance que l'on peut avoir dans ces techniques qui possèdent parfois un côté « boîte noire » et que l'on sait attaquables. Il faut donc intégrer des mécanismes de sécurité tout au long du « pipeline machine learning », de l'apprentissage à l'exploitation, pour éviter des attaques spécifiques. **Par exemple, on sait qu'on peut masquer un virus sous des dehors trompeurs afin de piéger un antivirus s'appuyant sur du machine learning. Il faut donc ajouter de la robustesse dans les mécanismes de reconnaissance.**

QUELS SONT LES OBJECTIFS DE LA COOPÉRATION ENTRE L'ANSSI ET INRIA ?

L.M. : Notre objectif premier est, comme nous l'avons illustré en réponse à la première question, de travailler ensemble sur des thématiques que nous avons conjointement identifiées comme importantes et demandant des réponses le plus rapidement possible afin d'augmenter le niveau de sécurité de nos futurs systèmes d'information. Un objectif connexe est de pouvoir bénéficier simultanément, pour la conception de solutions, des connaissances et de la culture scientifique et technique des agents de l'ANSSI et des chercheurs Inria. Ces connaissances et cette culture sont souvent proches, mais, de par leurs missions respectives, les chercheurs Inria maîtrisent certains outils théoriques ou peuvent avoir connaissance de certaines avancées scientifiques très récentes, tandis que les agents de l'ANSSI ont une vision plus précise et à jour des besoins de terrain et peuvent orienter des travaux de recherche en fonction de leur connaissance d'incidents de sécurité réellement constatés. Bien entendu, cette dualité est en réalité à frontière très floue.

G.H. : Tout en travaillant sur les sujets d'actualité comme ceux illustrés ci-dessus, un de nos objectifs est de construire une vision dans la durée et d'anticiper de futures thématiques. **Lorsque nous avons connaissance de certaines attaques ou preuves de concept développées en laboratoires, sans savoir si ces attaques se produiront réellement un jour sur le terrain, nous devons évaluer la vraisemblance de ce passage à la réalité et surtout concevoir les contre-mesures possibles pour s'en prémunir.** Enfin l'un des enjeux de notre travail commun est aussi de préparer un éventuel transfert technologique de nos découvertes.

LA CYBERSÉCURITÉ N'EST-ELLE QU'UNE QUESTION DE DÉFENSE ?

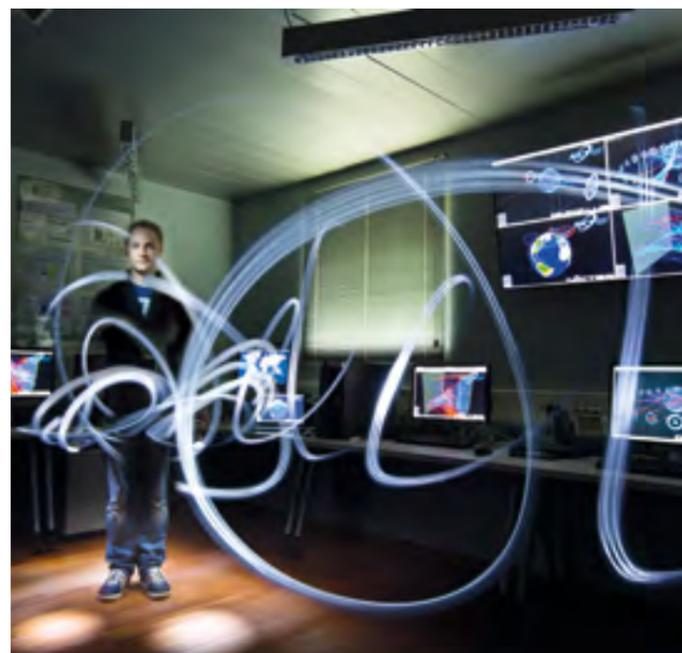
REVUE

2021

POLITIQUES PUBLIQUES

LA MISSION SÉCURITÉ-DÉFENSE EN APPUI AUX ARMÉES

En 2020, naissait chez Inria la Mission Sécurité-Défense sous la responsabilité de Frédérique Segond, visant à soutenir les politiques publiques dans le domaine du renseignement en servant d'interface entre la science et la technologie de nos équipes-projets et les acteurs du secteur. Deux ans plus tard, de nombreux partenariats se sont structurés autour de cette mission, avec l'ANSSI (Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information), la DGA (Direction générale de l'armement), la DRM (Direction du renseignement militaire), ou encore l'Agence Innovation Défense (AID). Leur objectif commun : répondre aux besoins de ces organisations en matière de cybersécurité et de hautes technologies numériques. D'autres partenariats ont également été développés avec des entreprises de la base industrielle de défense. Des démonstrateurs, mais également un centre de simulation et d'expérimentation, ont vu ou vont voir le jour... pour que les technologies développées soient par la suite transférées dans les projets concernés.



PRÉVENTION

Anticiper les cyberattaques de demain grâce au LHS

Le Laboratoire de haute sécurité (LHS), notamment développé par les ingénieurs du centre Inria Nancy – Grand Est et du Loria, est une sorte d'étrange bibliothèque de logiciels malveillants. Depuis sa création en 2008, il en a ainsi récolté plus de 35 millions ! Une fois le logiciel capturé, les chercheurs l'analysent, mais ils observent aussi l'évolution des cibles et des techniques dans le temps. Avec en ligne de mire l'ambition de réussir à prévenir les attaques. Un projet mené par l'équipe-projet Resist et Carnegie Mellon, ThreatPredict, a ainsi abouti à la création d'un algorithme qui, en combinant les données du darknet (partie cachée d'Internet), des réseaux sociaux et des événements sociaux et géopolitiques, s'attache à prédire les types de brèches auxquels les attaquants risquent de s'intéresser dans un avenir proche. Car en matière de cybersécurité aussi, mieux vaut prévenir que guérir.



PROJET SECUREIOT

RENFORCER LA SÉCURITÉ DES OBJETS CONNECTÉS

L'Internet des objets (IoT), par lequel de nombreuses machines communiquent entre elles, est un réseau à part entière... et donc potentiellement vulnérable. Face à cette problématique, le projet européen *SecureIoT* a pour objectif de renforcer la sécurité informatique des objets connectés et a permis d'élaborer une base de connaissances qui recense les vulnérabilités connues, mais aussi de mettre au point des solutions pour détecter et prédire des attaques contre les véhicules autonomes ou les robots compagnons. Le projet vient de donner naissance à une startup, *CybAI*.

W3PROOF

Améliorer la confiance dans les logiciels

Comment s'assurer qu'un logiciel fait bien ce qu'il est censé faire ? En produisant, grâce à la logique mathématique, une preuve formelle. Le défi à relever ? **Standardiser et certifier, grâce aux outils cryptographiques, les preuves mises au point, afin qu'elles puissent être réutilisées d'un programme à l'autre et d'un pays à l'autre.** C'est l'objectif de l'action exploratoire W3Proof menée par Inria.



MALIZEN

UN KIT POUR CYBERENQUÊTE

C'est à une véritable enquête que se livrent les analystes experts en sécurité lors d'une attaque par un nouveau logiciel : il s'agit de trouver la source du problème et ses conséquences. La bonne nouvelle est qu'aujourd'hui, il existe un outil qui leur facilite la vie : *ZeroKit*. Créé en 2021 par la startup *Malizen* (issue d'une collaboration entre

Inria et CentraleSupélec), ce logiciel récupère les journaux d'activité de l'ordinateur infecté et affiche toutes les informations susceptibles d'aider l'expert à poser son diagnostic. Un gain de temps précieux, qui pourrait encore augmenter : *ZeroKit* proposera bientôt directement des conseils aux experts.



ANTIVIRUS

FACE AUX NOUVEAUX RANSOMWARES, DAPSREN TROUVE LA PARAD

Les *ransomwares*, les logiciels de rançon, peuvent coûter des millions aux organisations qui en sont victimes. Et si les antivirus parviennent à bloquer ceux qui sont déjà connus, il n'existait aucun moyen de se protéger des nouveaux... jusqu'ici. Car la startup *Daspren*, incubée au *Startup Studio* d'Inria, propose désormais une solution : *Parad*. Elle consiste à produire un modèle représentant les données dans leur état normal et à mettre en place un mécanisme de sécurité dès qu'un changement suspect se produit. *Parad* empêche ainsi toute altération des données et préserve leur intégrité. En d'autres termes, il bloque le *ransomware*, sans même avoir à l'identifier !



Qu'est-ce que le quantique va changer à l'ordre mondial ?

À L'AVANT-GARDE DU QUANTIQUE

QU'EST-CE QUE LE QUANTIQUE VA CHANGER À L'ORDRE MONDIAL ?

DÉCRYPTAGE

LE QUANTIQUE, UNE RÉVOLUTION EN MARCHÉ

NÉE DANS LES ANNÉES 1980, L'INFORMATIQUE QUANTIQUE CHERCHE À CALCULER PLUS EFFICACEMENT EN AYANT RECOURS AUX LOIS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE PLUTÔT QU'À CELLES DE LA MÉCANIQUE CLASSIQUE.

Dans les années 1990, les premiers algorithmes offrant un gain, notamment en termes de rapidité de calcul, sont apparus. Ils ont ainsi motivé de nombreux groupes expérimentaux à se lancer dans la construction de systèmes susceptibles de démontrer la faisabilité d'un tel traitement. Trente ans après, les prototypes commencent à atteindre des tailles suffisantes pour pouvoir surpasser définitivement les machines classiques dans la résolution de tâches spécifiques. Néanmoins, de nombreux obstacles restent encore à surmonter pour mettre en production des algorithmes quantiques. Inria, au travers de ses équipes, s'attache à lever quelques-uns de ces verrous. Le premier est sans doute d'élargir encore et toujours le spectre des algorithmes quantiques susceptibles d'apporter un avantage (vitesse, précision, fiabilité, etc.) par rapport au calcul classique. Par ailleurs, différents modèles de calcul quantique existent, chacun contenant des

forces et des faiblesses, mais surtout des spécificités propres, notamment dans la nature des portes élémentaires et dans leurs contraintes topologiques. Les travaux sur les langages quantiques devront gommer l'essentiel de ces différences tout en réalisant de façon automatisée les optimisations indispensables au bon fonctionnement de ces machines. **Ces travaux rendront la programmation plus facile et donc plus accessible aux utilisateurs finaux dans la recherche et l'industrie. Enfin, le passage à l'échelle de ces machines est encore problématique en raison de l'accumulation d'erreurs qui ne sont pas corrigées.** Plusieurs techniques existent – tolérance aux fautes, autocorrection – et devront être encore plus largement développées et déclinées en architectures complètes. Elles devront permettre de calculer longtemps, de façon fiable, et avec suffisamment de qubits : ce sont les conditions nécessaires pour matérialiser l'avantage quantique.



HAROLD OLLIVIER
DIRECTEUR DE
QUANTUMTECH@INRIA

Quantique européen : l'Union fait la force

Les recherches dans le domaine du calcul quantique sont, par nature, très interdisciplinaires et intersectorielles, reposant sur un fort besoin de collaboration. Avoir en Europe une recherche au meilleur niveau est crucial, notamment parce que, de la maîtrise des technologies quantiques émergentes, dépendront possiblement l'autonomie stratégique des États et la compétitivité de leurs industries dans des secteurs critiques. **Pour éviter une trop forte fragmentation et duplication des initiatives, mobiliser les investissements nécessaires pour**

atteindre une masse critique et permettre à l'Europe d'avoir un leadership dans le domaine quantique, il faut veiller à ce que les efforts entrepris dans les États-membres se coordonnent à l'échelle européenne. La compétition est mondiale, et l'Europe a mis en place des initiatives pour soutenir la recherche de pointe en Europe, en proposant une gouvernance scientifique avec le *Quantum Technologies Flagship*, et plus récemment en s'engageant sur la construction d'une infrastructure européenne de communication quantique (EuroQCI).



MARIE-HÉLÈNE PAUTRAT
DIRECTRICE DES PARTENARIATS
EUROPÉENS CHEZ INRIA



CÉCILE VIGOUROUX
DIRECTRICE DES RELATIONS
INTERNATIONALES CHEZ INRIA

Le sujet quantique est devenu depuis quelques années un enjeu scientifique et géopolitique majeur : ainsi lors des comités mixtes en Science et Technologie qui ont eu lieu en 2021 entre la France et les États-Unis ou Singapour, ou encore lors de réunions dédiées avec le Canada, le sujet a été central afin de tracer les contours de futures collaborations bilatérales pour ouvrir d'autres voies qu'une unique bipolarisation du quantique entre Amérique du Nord et Chine. Le programme de Chaires Internationales Inria accueille notamment, de 2020 à 2024, Thomas Vidick, chercheur spécialiste de cryptographie quantique de l'université Caltech, au sein de l'équipe-projet COSMIQ. C'est grâce à de tels échanges de haut niveau qu'une régulation internationale en quantique se fera.

FOCUS PROJET

L'initiative européenne EuroHPC travaille sur le développement de simulateurs et d'ordinateurs quantiques pour 2027. Les équipes d'Inria participent au projet **HPCQS** (*High Performance Computer and Quantum Simulator hybrid*) qui intégrera deux simulateurs quantiques dans les supercalculateurs de deux centres européens de HPC. **Il s'agit d'un premier jalon vers une infrastructure européenne de calcul et de simulation quantiques.**

QU'EST-CE QUE LE QUANTIQUE VA CHANGER À L'ORDRE MONDIAL ?

REVUE

2021

CRYPTOGRAPHIE

Une signature digitale unique et indéchiffrable

Un article corédigé par cinq chercheurs, Antonin Leroux (Inria), Luca De Feo (IBM Research), David Kohel (IMM), Christophe Petit (Univ. Libre de Bruxelles) et Benjamin Wesolowski (Inria), a obtenu un Best Paper Award de la conférence internationale Asiacrypt. Les auteurs proposent un protocole de signature digitale capable de résister aux attaques des supercalculateurs quantiques de demain. Pour signer un

message, l'expéditeur génère une suite de caractères spécifiques que lui seul peut réaliser. Quant aux destinataires, ils peuvent vérifier l'identité de l'émetteur. Ces travaux anticipent l'arrivée des ordinateurs quantiques d'ici dix à vingt ans. Bien plus puissants que nos machines actuelles, ils bousculeront les méthodes de cryptographie qui protègent aujourd'hui nos communications et nos données personnelles.



QUANTUMTECH@INRIA INFORMATIQUE QUANTIQUE : L'AMBITION À LA RELANCE



Les premiers travaux d'Inria sur l'informatique quantique datent de 2001. Depuis, l'institut n'a cessé de monter en puissance sur cette thématique. Il compte désormais cinq équipes-projets de premier plan, collabore avec des startups, et a signé plusieurs partenariats industriels avec de grandes sociétés technologiques. Le programme QuantumTech@Inria a été créé en avril 2021 pour définir et accélérer le déploiement de la stratégie de l'institut dans ce domaine. Il est également un maillon essentiel de la mise en œuvre de la stratégie nationale quantique : le plan France Relance comprend en particulier un ambitieux Plan Quantique doté de 1,8 milliard d'euros. Inria y est pleinement engagé et copilote avec le CEA et le CNRS un PEPR (Programme et équipements prioritaires de recherche) ainsi que la plateforme nationale de calcul quantique hybride.

PARTENARIAT

Atos joue la carte de la recherche

La société Atos est présente dans 71 pays et compte 105 000 collaborateurs. En avril 2021, elle a signé un partenariat stratégique avec Inria pour structurer et approfondir ses relations avec le monde de la recherche informatique. Les résultats obtenus conjointement seront intégrés à terme dans les solutions de l'industriel. L'accord porte sur six thématiques scientifiques, dont le calcul quantique, avec des travaux axés sur les langages de programmation de haut niveau et les codes correcteurs d'erreurs.



CRYPTANALYSE

GABRIELLE DE MICHELI, PRIX L'ORÉAL-UNESCO

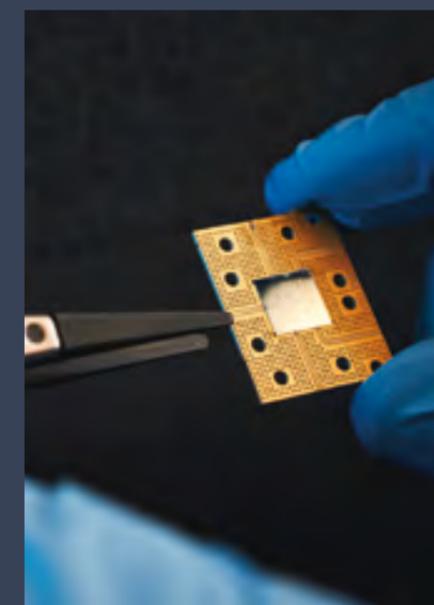
Américaine de naissance, italienne par son père et française par sa mère, Gabrielle de Micheli est une jeune scientifique de haut vol. Sa spécialité : la cryptanalyse, ou chiffrement des données sensibles grâce à des algorithmes spécifiques. Elle y a consacré une thèse, commencée aux États-Unis puis menée pour l'essentiel

au centre Inria Nancy - Grand Est. Pendant trois ans, elle s'est penchée sur les logarithmes discrets, des problèmes mathématiques complexes qui sécurisent les communications sur Internet. Son parcours lui vaut d'être l'une des lauréates du Prix Jeunes Talents France 2021 - l'Oréal - Unesco.



STARTUP À LA RECHERCHE DU QUBIT IDÉAL

Anciens doctorants dans une équipe commune Inria - ENS, Théau Perronin et Raphaël Lescanne ont fondé en 2020 la startup Alice & Bob. Ils développent un ordinateur quantique révolutionnaire, car débarrassé de son problème n° 1 : les multiples erreurs générées par les bits quantiques (qubits). Alors que Google et IBM tentent d'y remédier en augmentant le nombre de qubits, les deux entrepreneurs explorent une voie opposée : ils conçoivent des qubits supraconducteurs « idéaux », capables de corriger d'eux-mêmes une partie de leurs erreurs.



THÈSE

Vive les erreurs vertueuses !

Chercheur dans l'équipe-projet Grace, Thomas Debris-Alazard a reçu le prix Gilles Kahn pour sa thèse sur la cryptographie fondée sur les codes correcteurs d'erreurs. Le principe ? Chiffrer les messages grâce à ces codes, qui modifient le contenu d'une façon très spécifique, impossible à reproduire. Le destinataire peut identifier l'émetteur et vérifier que le contenu de départ n'a pas été transformé.

Rencontre
avec

Philippe Durance

LE TEMPS DE LA PROSPECTIVE

PHILIPPE DURANCE EST ÉCONOMISTE.

Il est professeur au Conservatoire National des Arts & Métiers (CNAM) et chercheur au Laboratoire interdisciplinaire de recherche en sciences de l'action (LIRSA).



Titulaire de la chaire de Prospective et Développement durable, président de l'Institut des futurs souhaitables et auteur, en 2014, de l'ouvrage La prospective stratégique en action, Philippe Durance est un spécialiste de la prospective. Il accompagne de nombreuses organisations publiques et privées dans leur réflexion prospective et stratégique.

La prospective est née d'un constat : nos sociétés sont trop tournées vers le passé. Les décisions y sont prises essentiellement sur la base de lois ou de modèles, établis à partir de l'observation de régularités. L'intérêt d'une telle approche est de permettre la prévision : la connaissance du passé permet la connaissance du futur. Dans un monde stable, une telle considération est possible. Dans un monde incertain, où le changement est devenu une donnée normale et quotidienne de l'expérience, les situations auxquelles les organisations sont confrontées sont sans cesse nouvelles. Les modèles établis ne fonctionnent plus et la prévision peine à éclairer la décision.

Partant de ce constat, deux approches sont possibles. La première consiste à revoir en profondeur les modèles existants pour les adapter à la nouvelle réalité observée et renouveler ainsi leur capacité à prévoir. La question fondamentale est alors de savoir à partir de quand un modèle doit être nécessairement révisé ; quels sont les événements qui peuvent nous indiquer que la réalité a suffisamment changé, qu'elle échappe à nos grilles d'analyse et qu'il faut impérativement les modifier ? Cette question préoccupe aujourd'hui quelques économistes¹. Peu de crises ont entraîné une refonte des principes fondamentaux de la théorie économique : la Grande Dépression de 1929, par exemple, a ouvert la voie à la théorie keynésienne. La crise de 2008, quant à elle, bien que toujours présente à nos esprits, n'a pas nécessité une refonte du cadre théorique standard pour comprendre *a posteriori* ce qui est arrivé ; il a suffi de revoir à la marge le modèle existant pour y intégrer quelques nouveaux éléments. Mais, dans ce cas précis, la science économique a failli par son défaut de prévision et a laissé le politique gérer la situation dans l'urgence. **Aujourd'hui, pour certains, en particulier face aux conséquences du changement climatique, la nécessité d'une nouvelle théorie économique se fait ressentir. Seule certitude, elle ne ressemblera ni à celle du passé, ni même à celle du présent².**

La seconde approche considère l'avenir comme un territoire à explorer. Il n'est plus question ici de prévision, mais de prospective. L'idée n'est plus de prolonger le passé dans l'avenir, mais d'analyser, systématiquement et avec méthode, les futurs possibles pour interroger le présent et dégager un futur souhaitable. **La prospective s'oppose ainsi au principe de détermination de l'avenir, souvent**



sous-entendu par la prévision. Elle considère que l'avenir n'est pas écrit à l'avance, mais qu'il est le résultat de la décision humaine. Cette attitude fait naître une opportunité sans pareil, puisque demain dépend de nous. Mais elle représente aussi une charge importante : elle nous rend responsables, nous humains, du présent face aux générations futures, car ce sont les décisions prises, ou pas, aujourd'hui qui feront advenir le monde de demain.

La prospective a émergé d'une prise de conscience : l'être humain a la faculté de concevoir des technologies, dont les usages possibles et leurs conséquences sont loin d'être prévisibles. L'objectif initial poursuivi par son fondateur, le philosophe français Gaston Berger, était de **réconcilier la sagesse (la science) et la puissance (la politique) pour que les décisions intègrent, ex ante, une réflexion éthique sur le futur.** Ce principe vaut toujours de nos jours alors que les réseaux, l'intelligence artificielle, le quantique, entre autres, ouvrent des mondes nouveaux et inexplorés.

1. Cf. l'article du Prix Nobel d'économie Paul Krugman, « When Do We Need New Economic Theories? », paru dans le New York Times du 8 février 2022.
2. Cf. l'entretien avec Stephen Marglin, professeur d'économie à Harvard, Le Monde, 18 février 2022.

BILAN FINANCIER

RAPPORT ANNUEL BUDGÉTAIRE DE L'EXERCICE 2021

Le budget initial d'Inria pour l'année 2021 voté en décembre 2020 s'est établi en ressources à 259,8 M€ et en dépenses à 264,2 M€.

Concernant l'exécution du budget 2021 et côté recettes, la **subvention pour charges de service public (SCSP)** se situe à 189,7 M€ contre 178 M€ en 2020 et 176,6 M€ en 2019. Elle représente 72% des recettes encaissées pour l'exercice 2021.

Les ressources propres encaissées se situent à 74,8 M€ soit un taux d'exécution de 83 % par rapport aux montants inscrits au dernier budget rectificatif. Elles représentent 28 % de l'ensemble des ressources de l'Institut pour 2021.

Les **ressources totales** encaissées ont été de **264,4 M€** en 2021 soit un taux d'exécution par rapport au budget rectificatif de **96 %**.

Par nature, les dépenses sont ventilées comme suit : 188,7 M€ de charges de personnel (76,5 % des dépenses totales), dont 138,2 M€ de masse salariale limitative et 50,5 M€ de masse salariale non limitative.

L'effectif des personnels « sous plafond » (c'est-à-dire dont la rémunération est assise sur la SCSP) a atteint 1 516,6 équivalents temps plein travaillé (ETPT) contre 1 604,5 en 2020 et 1 605 en 2019 pour une prévision au budget initial 2021 de 1 551,4 ETPT.

L'effectif des personnels « hors plafond » (c'est-à-dire ceux dont la rémunération est assise sur ressources propres) a été de 1 091,8 ETPT contre 848,6 en 2020 et 765,8 ETPT en 2019.

■ 52,5 M€ de **dépenses de fonctionnement et d'investissement non programmé (FCI)** ;

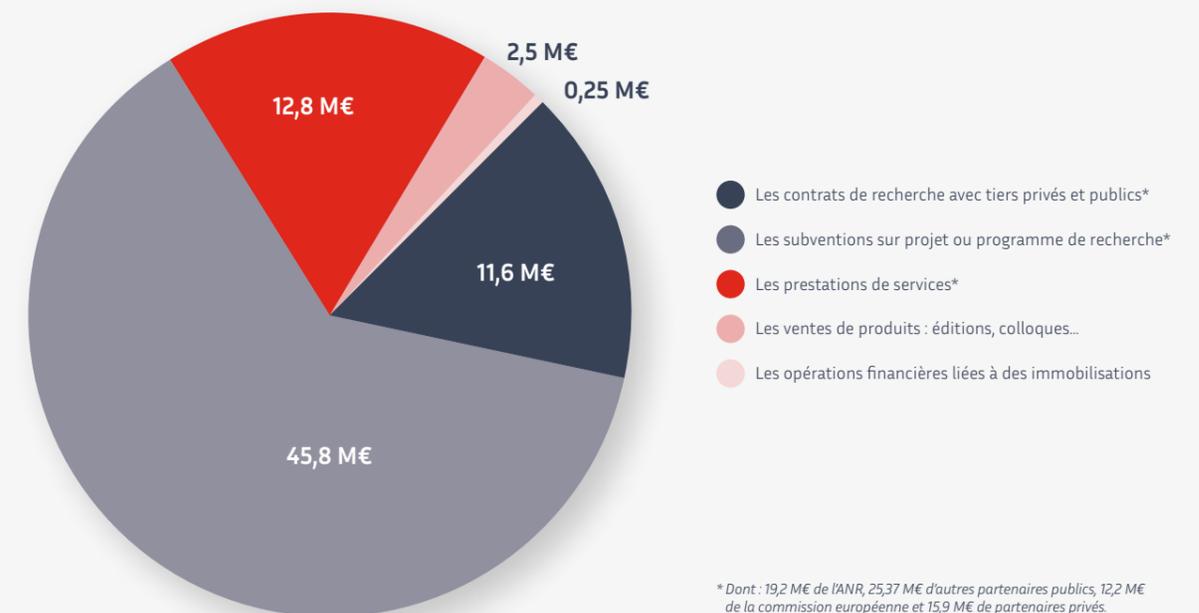
■ 5,5 M€ de **dépenses relatives aux opérations d'investissement programmées (OIP)**.

Globalement, les dépenses décaissées 2021 ont été de 246,8 M€ pour une prévision initiale de 264,2 M€ soit un taux d'exécution de 93 %.

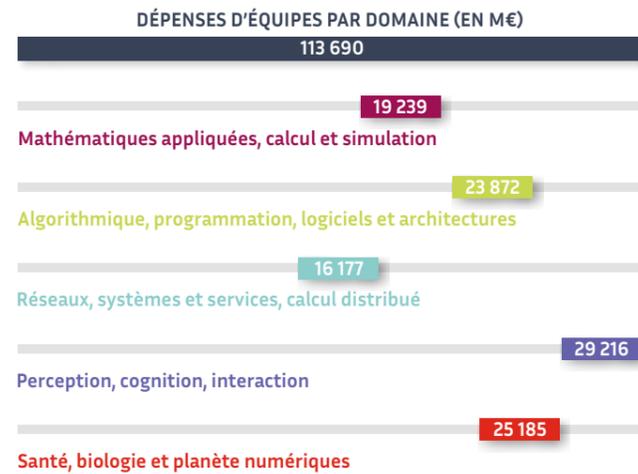
Par destination, les dépenses décaissées en 2021 ont porté :

- pour 160 M€ sur les activités scientifiques des centres de recherche (agrégat 1) soit 65 % des dépenses totales 2021 ;
- pour 21,7 M€ sur les actions de recherche communes (agrégat 2) soit 9 % ;
- pour 65 M€ sur les fonctions support (agrégat 3) soit 26 %.

LES RESSOURCES PROPRES ONT PRINCIPALEMENT POUR ORIGINE



Les thèmes scientifiques correspondant aux grands objectifs de l'institut sont retracés dans le compte de résultat et prennent en compte l'intégralité des dépenses quelles que soient leurs sources de financement et tout agrégat confondu.



CERTIFICATION DU COMPTE FINANCIER

Comme c'est le cas depuis 2010, les comptes 2021 ont fait l'objet d'une certification par deux commissaires aux comptes. Les comptes de l'exercice 2021 ont été certifiés sans réserve par ces deux auditeurs indépendants (cabinets *Ernst & Young* et *KPMG*).

L'année 2021 a été marquée par la poursuite des actions visant à l'atteinte des objectifs du COP 2019-2023 et ce, malgré le contexte de crise sanitaire qui a perduré et impacte encore cette année les résultats financiers qui restent, comme en 2020, atypiques.

Le compte de résultat 2021 fait apparaître un résultat bénéficiaire de + 5,6 M€ (contre un bénéfice de + 9,3 M€ pour l'année précédente).

En 2021, les produits de fonctionnement enregistrent une hausse de + 10,1 % (+ 15,2 M€), qui résulte principalement :

- d'une augmentation de + 6,6 % de la subvention pour charges de service public (+ 11,7 M€), qui s'explique notamment par des crédits complémentaires au titre du plan IA (+ 3,3 M€), mais aussi, dans sa composante de base, par un montant de 4 M€ versé en décembre 2021 au titre d'une avance sur le contrat d'objectif et de moyen dont la notification est prévue pour 2022 ;
- d'une augmentation importante des produits directs d'activité (+ 15,2 M€), qui s'explique principalement par l'incidence des activités de l'institut menées en appui des politiques publiques dont le marché d'assistance à maîtrise d'œuvre conclu avec la DGS pour le déploiement de l'application TousAntiCovid : cette hausse des produits est néanmoins contrebalancée et *in fine* neutralisée par la constatation de charges de sous-traitance à hauteur d'un montant presque équivalent (cf. développement infra).

Les charges de fonctionnement, également en hausse par rapport à l'exercice précédent, enregistrent une augmentation de + 12,0 % (+ 29,6 M€) qui est la conséquence notamment des facteurs suivants :

- l'incidence des activités de l'institut menées en appui des politiques publiques dont le marché relatif au projet *TousAntiCovid*, mentionnée ci-dessus, conduit à majorer les charges de l'exercice à hauteur de + 16,2 M€ ;
- les autres charges externes (« consommations d'approvisionnements, travaux et services ») restent globalement à un niveau similaire à celui de 2020, avec en particulier un étiage bas des frais de missions et de réception qui traduit la persistance des restrictions de déplacement induites par la crise sanitaire ;
- les charges de personnel enregistrent une augmentation de + 6,7 % (+ 11,1 M€), conséquence d'une part d'une augmentation globale des effectifs (+ 6,5%), et d'autre part de la revalorisation de certaines primes (prime de recherche, IFSE, PEDR), en lien notamment avec la mise en œuvre du protocole d'accord sur les rémunérations et les carrières du 12 octobre 2020.

Le total du bilan (actif et passif) s'établit à 319,4 M€ en 2021 contre 286,1 M€ en 2020.

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION
BRUNO SPORTISSE

DIRECTEUR DE LA COMMUNICATION
LAURENT STENCEL

RÉDACTRICE EN CHEF
ARIANE BEAUVILLARD

CONCEPTION GRAPHIQUE ET ÉDITORIALE
TERRE DE SIENNE

TEXTES
INRIA ET MÉDIATHÉNA

CRÉDITS PHOTOS

© Inria / M. Magnin p. 4, 34
© Inria / C. Morel p. 6-7, 10, 17, 23, 24-25, 28
© Inria / B. Fourier p. 10, 18-19, 20, 27, 28, 33, 35, 36-37
Shutterstock / NicoElNino p. 11
© Inria / É. Garault p. 11
© Inria / H. Raguet p. 12
© Inria / G. Scagnelli p. 15, 16, 33
© Inria / F. Nussbaumer – Signatures p. 16
© G. Guerout p. 21
© Inria / R. de Bengy p. 22
© Inria / D. Betzinger p. 22
@pixabay p. 23
© J.-C. Caslot p. 33
© N. Hoppenot p. 33

Collection particulière / Fabien Gandon p. 9 ; Renaud Vedel p. 9 ;
Alexandre Mebazaa p. 15 ; Hubert Duault p. 26 ;
Geoffroy Hermann p. 27 ; Harold Ollivier p. 32

Getty Images
iStock



Inria.fr

Inria