



HAL
open science

Infrastructures matérielles et logicielles (réseaux de communication, traitement et stockage) pour la société numérique

Fatiha Boujdaine, Nazim Agoulmine

► **To cite this version:**

Fatiha Boujdaine, Nazim Agoulmine. Infrastructures matérielles et logicielles (réseaux de communication, traitement et stockage) pour la société numérique: Les cahiers de l'ANR - n° 9. 2016. hal-03413135

HAL Id: hal-03413135

<https://hal.science/hal-03413135>

Submitted on 21 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INFRASTRUCTURES MATÉRIELLES ET LOGICIELLES

(RÉSEAUX DE COMMUNICATION,
TRAITEMENT ET STOCKAGE)
POUR LA SOCIÉTÉ NUMÉRIQUE

CAHIERS DE L'ANR N° **09**

NOVEMBRE 2016

Les “Cahiers de l’ANR” traitent de questions thématiques transverses aux différents appels à projets financés par l’ANR. Cette collection, qui existe depuis 2009, met en perspective les recherches, les innovations et les avancées technologiques en cours dans un domaine spécifique. Sans prétention d’exhaustivité, son objectif est de revenir sur les enjeux sociétaux et les défis d’avenir identifiés par les communautés de recherche mobilisées sur une thématique. Les projets de recherche financés par l’ANR y sont synthétiquement présentés. Chaque Cahier s’adresse aux chercheurs, aux décideurs politiques mais aussi au grand public. Ils sont organisés en deux parties : une partie qui précise les enjeux des projets financés par l’ANR et leur impact, et une partie sous forme de “fiches projets”, qui détaillent, pour chaque projet financé, ses objectifs, ses résultats et les équipes qu’il a mobilisées.

La collection des Cahiers de l’ANR comporte neuf éditions, toutes disponibles sur le site internet de l’ANR : www.anr.fr



N°1 - JUIN 2009

Mobilité et ubiquité :
vers le nomadisme numérique



N°6 - DÉCEMBRE 2012

Contaminants et environnements :
constater, diffuser, décider



N°2 - JUILLET 2010

L'énergie partagée :
une vision nouvelle de l'habitat,
de la voiture et du territoire



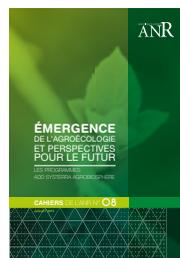
N°7 - AVRIL 2013

Environnement et Changements Globaux :
des aléas à la vulnérabilité
des sociétés



N°3 - JANVIER 2010

Le calcul intensif :
technologie clé pour le futur



N°8 - SEPTEMBRE 2015

Émergence de l'Agroécologie :
perspectives pour le futur.
Les programmes
ADD-SYSTERRA-AGROBIOSPHERE



N°4 - MARS 2012

Intelligence Artificielle et Robotique
“Confluences de l’Homme
et des STIC”



N°9 - NOVEMBRE 2016

Infrastructures matérielles et logicielles
(Réseaux de communication,
Traitement et Stockage)
pour la Société Numérique



N°5 - JUILLET 2012

Les nanotechnologies :
un nouveau paradigme

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE

ANR

▶ CE CAHIER A ÉTÉ RÉALISÉ PAR

Fatiha Boujdaine, Chargée de projets scientifiques sous la direction de Nazim Agoulmine, Responsable du département NuMa avec le concours et la contribution de plusieurs experts du domaine (par ordre alphabétique), Olivier Audouin (Directeur des affaires externes, Nokia - Bell Labs France et membre de comité de pilotage ANR), Jean-Luc Beylat (VP Ecosystems & Market Enablers de Nokia et Président de Systematic Paris-Region, membre du comité de pilotage ANR), Michel Daydé (Directeur de l'IRIT et Délégué scientifique au CNRS en charge du calcul haute performance), Éric Fleury (Professeur à l'École Normale Supérieure de Lyon, titulaire d'une Chaire Inria et responsable de l'équipe de recherche DANTE), Valère Robin (Directeur technique Architecture, sécurité et enablers Orange labs), et Christian Rumelhard (Professeur CNAM honoraire - Conservatoire National des Arts et Métiers) et avec le concours de la Direction de la communication de l'ANR : Julie Gielen et Marie Fillon.

Il met en perspective les recherches, les innovations et les avancées technologiques en cours dans le domaine des infrastructures matérielles et logicielles. Sans prétention d'exhaustivité, son objectif est de revenir sur les enjeux sociétaux et les défis d'avenir notamment sur l'évolution de ces enjeux au cours des années. Les projets de recherche financés par l'ANR entre 2008 et 2011 dans le cadre de plusieurs appels à projets y sont synthétiquement présentés.

Les "Cahiers de l'ANR" sont dorénavant imprimés dans un format réduit. Seule la partie introductive est imprimée. La partie qui compile les "fiches projets" est numérisée et disponible via la webkey en fin de document.



**LES INFRASTRUCTURES
MATÉRIELLES ET LOGICIELLES**

SONT AU CŒUR DU FONCTIONNEMENT
DE NOTRE SOCIÉTÉ NUMÉRIQUE, SIÈGES
DE SA MÉMOIRE, DE SON INTELLIGENCE
ET DE LA COMMUNICATION
DE SES INFORMATIONS



AVANT-PROPOS

L'activité économique et sociale des pays développés est aujourd'hui crucialement dépendante des infrastructures numériques. Ces dernières, à l'image d'internet, des centres de calcul et de données, du web, des réseaux sociaux, etc. sont la source de nouveaux développements économiques, sous la forme de nouveaux services à vocation commerciale ou non. La maîtrise de la conception et du développement de ces infrastructures est un enjeu économique majeur pour la France et l'Europe, notamment en raison des effets d'échelle et de leur caractère génératif. Le défi consiste à produire, déployer et maîtriser des infrastructures de communications, de calcul, de stockage et de services distribués, omniprésents, convergents et inter-opérants pour supporter les nouveaux usages (souvent inconnus à ce jour) au sein de la société numérique d'aujourd'hui et du futur. Ces infrastructures jouent un rôle clé. Elles permettent le développement de nouvelles technologies et nouveaux usages centrés sur le citoyen, de technologies innovantes pour stimuler la recherche et l'innovation, ainsi que la compétitivité des entreprises françaises au niveau national, européen et international. Ces domaines font partie des priorités de la Stratégie Nationale de la Recherche Française et sont considérés parmi les domaines les plus porteurs en termes d'innovation et de création d'emploi pour la future société numérique.

Ce cahier ANR met en perspective les recherches, les innovations et les avancées technologiques en cours dans le domaine des infrastructures matérielles et logicielles. Sans prétention d'exhaustivité, son objectif est de revenir

sur les enjeux sociétaux et les défis d'avenir notamment sur l'évolution de ces enjeux au cours des années. Les projets de recherche financés par l'ANR entre 2008 et 2011 dans le cadre de plusieurs appels à projets y sont synthétiquement présentés. En particulier, seront présentés les verrous scientifiques et technologiques qui ont été levés grâce aux financements de l'ANR dans les domaines stratégiques que sont les infrastructures pour les réseaux de communications du futur, les infrastructures pour le HPC et le cloud, les infrastructures de services, et enfin les composants pour les télécommunications. Ces projets ont été sélectionnés pour leur excellence scientifique par des comités d'évaluation scientifique et de pilotage composés d'experts nationaux et internationaux du domaine. Enfin, ce cahier présente les résultats d'une enquête réalisée auprès d'un ensemble de porteurs de projets finalisés pour analyser les facteurs qui ont le plus contribué à la réussite des projets ainsi que les obstacles qui en ont freinés l'avancement.

Il apparaît clairement que le financement de l'ANR est crucial pour le développement des connaissances dans les laboratoires de recherche (académiques et industriels) et constitue un moteur qui favorise la coopération entre les organismes publics et privés, et la diffusion de connaissances entre ces deux environnements. Grâce aux différents appels à projets lancés, les financements alloués par l'agence dans ces domaines ont été des leviers cruciaux pour positionner et maintenir la recherche et l'industrie en France dans le peloton de tête de la compétition internationale dans ces domaines à fort potentiel d'innovation et de croissance.

Nazim AGOULMINE
Responsable du département Numérique et Mathématiques de l'ANR



**LE DÉFI CONSISTE À PRODUIRE,
DÉPLOYER ET MAÎTRISER**

DES INFRASTRUCTURES
DE COMMUNICATIONS, DE CALCUL,
DE STOCKAGE ET DE SERVICES
DISTRIBUÉS, OMNIPRÉSENTS,
CONVERGENTS
ET INTER-OPÉRANTS



SOMMAIRE

INTRODUCTION :

DIVERSIFICATION ET CROISSANCE DES INFRASTRUCTURES INTERNET ET RÉSEAUX, DES DÉFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES	8
---	---

1 - THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES, ENJEUX DE RECHERCHE ET APPORTS DES PROJETS

SOUTENUS PAR L'AGENCE.....12

L'ACTION DE L'ANR EN CHIFFRES.....	12
INFRASTRUCTURES POUR LES RÉSEAUX DU FUTUR.....	25
INFRASTRUCTURES POUR LE HPC ET LE CLOUD	33
INFRASTRUCTURES DE SERVICES	44
COMPOSANTS POUR LES TÉLÉCOMMUNICATIONS	51

2 - RETOUR D'EXPÉRIENCE RÉALISÉ AUPRÈS DES PROJETS PRÉSENTÉS

DANS CE CAHIER..... 58

TOUR D'HORIZON DES RÉPONDANTS.....	58
ANALYSE SWOT (STRENGTHS - WEAKNESSES - OPPORTUNITIES - THREATS) OU MOFF (MENACES - OPPORTUNITÉS - FORCES - FAIBLESSES).....	60

LISTE DES PROJETS PRÉSENTÉS DANS CE CAHIER : 82

LES AUTEURS ET LEURS CONTRIBUTIONS 90

DIVERSIFICATION ET CROISSANCE DES INFRASTRUCTURES INTERNET ET RÉSEAUX, DES DÉFIS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Avec l'explosion de l'internet et des applications réseaux, les infrastructures matérielles et logicielles sous-jacentes, malgré leur importance majeure, sont peu perceptibles et peu visibles des utilisateurs finaux. Ces derniers en prennent plus conscience lorsqu'un dysfonctionnement vient perturber l'accès à leurs contenus préférés, la communication avec leurs services et interlocuteurs habituels, ou encore les processus de leur entreprise. En effet ces infrastructures, bien que "discrètes", sont au cœur du fonctionnement de notre société numérique, sièges de sa mémoire, de son intelligence et de la communication de ses informations. Et avec la numérisation galopante de nombreux secteurs, et l'utilisation généralisée des services et applications hébergés de manière répartie au sein du cloud, le rôle de ces infrastructures va croissant. Les transports, la distribution de l'énergie, la santé, la ville et les bâtiments intelligents, l'éducation, l'entreprise, la R&D et la production industrielle font tous de plus en plus appel pour leur optimisation à du traitement, du stockage et des échanges de données numériques massifs sollicitant les infrastructures avec une intensité et des contraintes inédites.

Cette croissance et cette diversification de l'utilisation des infrastructures ne vont pas sans poser des défis scientifiques et technologiques importants, nous en décrivons quelques-uns ci-dessous.

RÉPONDRE À L'AUGMENTATION CONSTANTE DE LA CONSOMMATION

Le premier d'entre eux a trait au passage à l'échelle. On prévoit 3,9 milliards de personnes connectées en 2017, plus de 70 milliards d'objets connectés à horizon 2020, 720% de croissance du trafic vidéo et 440% de croissance du trafic du cloud et des centres de données entre 2012 et 2017, l'explosion des smartphones et tablettes, des applications "big data" de plus en plus gourmandes en capacité de calcul et de stockage... Les infrastructures doivent trouver des réponses à de telles ruptures d'échelles, tout en maintenant des niveaux acceptables de coût et de consommation énergétique. Les systèmes de transmissions filaires et sans fil, les routeurs, les fermes

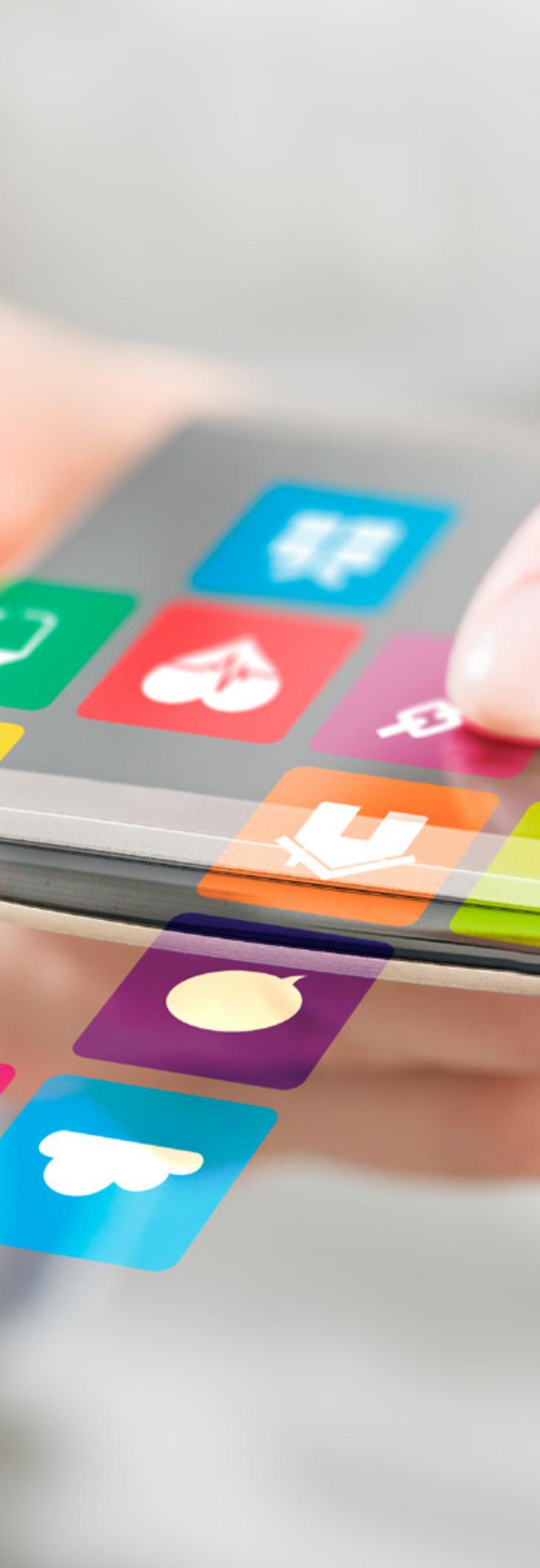
de stockage, les serveurs de calcul sont tous soumis à ce défi de montée en capacité. Briques de base de ces systèmes, les composants électroniques et photoniques ont un rôle clef pour rendre possible ces changements radicaux d'échelles. Cela passe par des optimisations de leurs performances de compacité, de consommation énergétique, de bande passante, de puissance, de bruit, ou encore de richesse de fonctions, afin de tirer meilleur parti des capacités de technologies hybrides.

GAGNER EN AGILITÉ

Un second défi que les infrastructures se doivent de relever réside dans de nécessaires adaptabilités et flexibilités sans précédent. La diversification des applications des infrastructures soulignée précédemment s'accompagne d'une forte disparité de besoins en termes de performances (telles que latence, bande passante, capacité de traitement) et de qualité de service, ainsi que d'une forte dynamique des besoins en termes de ressource. Dans ce contexte, les infrastructures doivent gagner en agilité pour offrir des solutions finement personnalisées en fonction des applications et de leur contexte d'utilisation. Cela exige un haut niveau de reconfigurabilité au niveau matériel, une programmabilité accrue des composants et des infrastructures, des interfaces ouvertes vers les gestionnaires de service pour des déploiements et des modifications rapides, et une intelligence opérationnelle pour l'optimisation dynamique de ressources devant être mobilisées au bon endroit et au bon moment sans pour autant en "gaspiller".

GARANTIR LA FIABILITÉ ET LA SÉCURITÉ

Un troisième défi qu'il convient de souligner est la confiance, terme comprenant la fiabilité, la résilience face aux pannes, et la sécurité pour se prémunir contre les attaques visant à perturber le fonctionnement ou à accéder frauduleusement aux données. Les infrastructures sont et seront de plus en plus amenées à être le support d'applications critiques (songeons par exemple à des



applications des voitures connectées pour la sécurité de la circulation, à la télé-médecine, à la production et la distribution de l'énergie) pour lesquels des défaillances seraient catastrophiques. De plus, la multiplication des objets communicants, la virtualisation permettant de partager le matériel entre de multiples applications et clients, les infrastructures de plus en plus programmables, gérées par une pluralité d'opérateurs, renforcent l'acuité et la complexité de ces problématiques de sécurité.

Dans le même temps, ces infrastructures connaissent une formidable mutation technologique, à même de bouleverser les architectures, les modes opératoires, ainsi que les positions et les modèles économiques des acteurs commerciaux. Il s'agit de la convergence entre infrastructure informatique et infrastructure télécom. Un continuum fonctionnel s'installe dans le cloud entre les "data centers" et les "points de présence" des réseaux, les premiers pouvant héberger des fonctions télécoms migrant d'équipements dédiés à des serveurs standards grâce à la virtualisation, les seconds tendant à héberger des contenus et des traitements au plus près des utilisateurs. Des technologies unifiées pour la programmation et le contrôle des équipements télécom et informatique émergent. Ces approches participent clairement à relever les défis de passage à l'échelle et de flexibilité/agilité (mutualisation et élasticité des ressources, rapidité de déploiement des services, contrôle unifié de bout en bout). Elles ouvrent aussi tout un champ de possibles à investiguer en matière d'optimisation d'architecture et de contrôle, comme en matière de chaîne de valeur des services intermédiaires et/ou transverses entre infrastructures et applications finales.

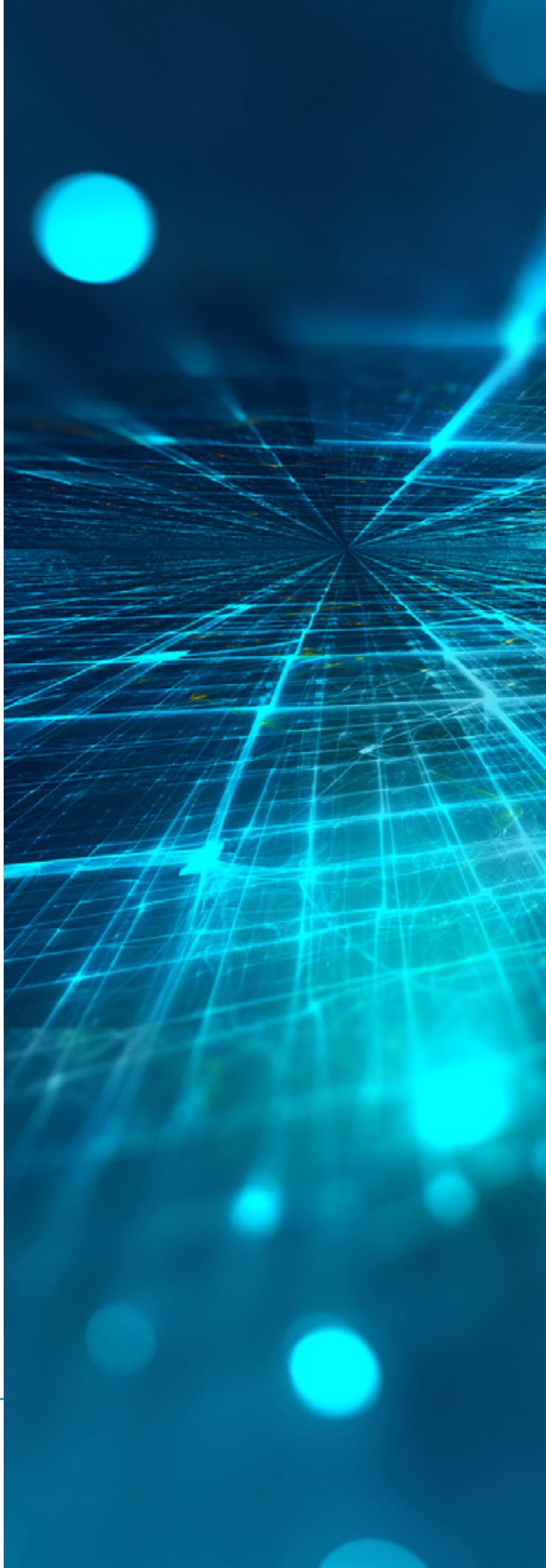
RÉPONDRE À LA CONCURRENCE MONDIALE EN FÉDÉRANT LA RECHERCHE NATIONALE ET LA RECHERCHE EUROPÉENNE

Les enjeux économiques sont majeurs, ces infrastructures touchant un grand nombre de marchés et nécessitant des investissements importants, il s'agit de trouver les bons modèles économiques dans un contexte où le tropisme de la valeur va principalement vers les contenus et les applications. La compétition est mondiale et ces dernières années ont été marquées par la fulgurance de la montée en puissance des acteurs asiatiques. De nombreuses initiatives de R&D se sont mises en place en Europe et dans le monde pour relever les défis du domaine. Les infrastructures réseau "5G", qui ciblent un déploiement dès 2020, sont ainsi l'objet d'initiatives telles que le programme de recherche 863 ou l'"IMT-2020 (5G) promotion group" en Chine, l'"Intel strategic research alliance" aux US, le

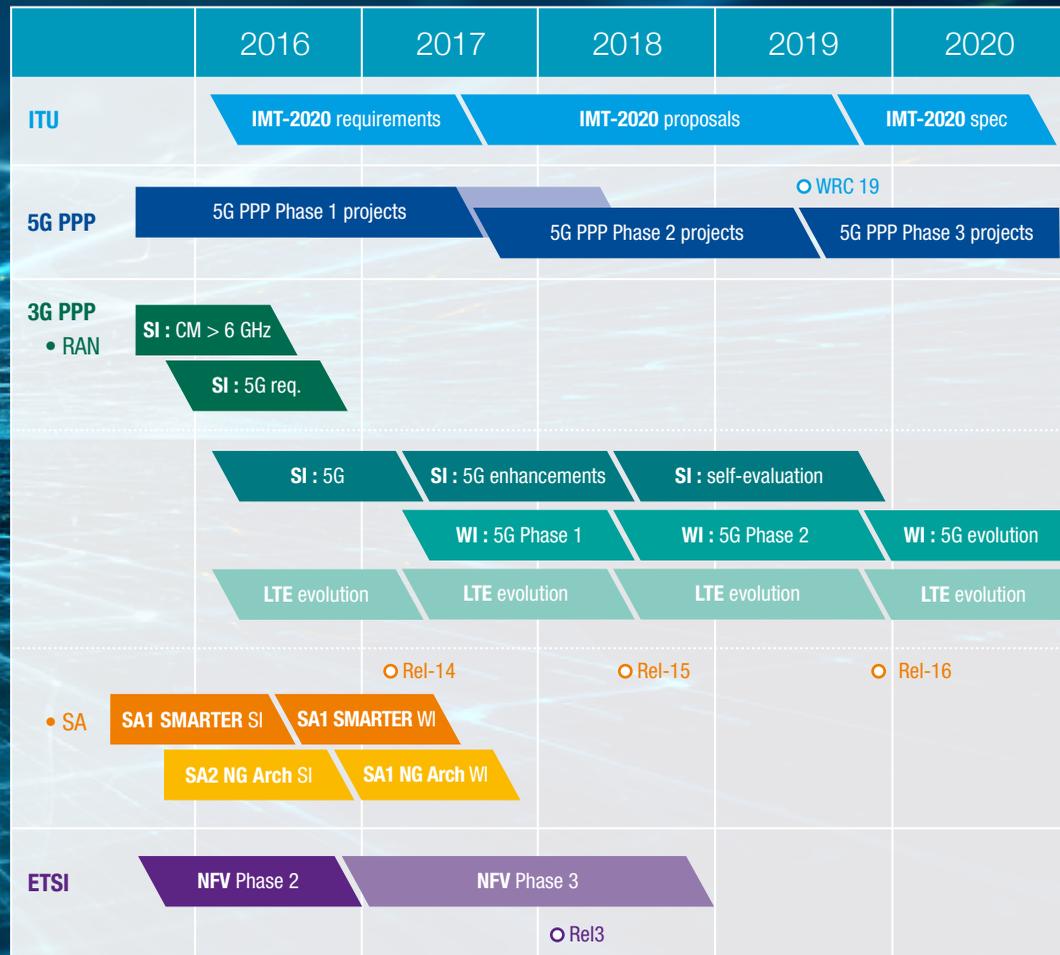
“5G Forum” en Corée, les “5G labs” de l’université de Dresde en Allemagne, ou le partenariat public privé (PPP) “infrastructure 5G” dans le cadre du programme Européen Horizon 2020. Au sein de ce même programme H2020, un partenariat sur le calcul haute performance (HPC) a également été mis en place. Ces initiatives démontrent, s’il en était besoin, l’importance des enjeux liés aux infrastructures numériques. Dans ce contexte, l’ANR joue un rôle clef pour structurer une recherche de haut niveau, développer des collaborations ambitieuses au sein de la communauté française académique et industrielle sur ces sujets, et la rendre plus forte et plus visible sur le plan européen et mondial. Des programmes de l’ANR passés tels que ARPEGE (systèmes embarqués et grandes infrastructures), VERSO (réseaux et services du futur), PNANO (nanosciences et nano technologie), INFRA (infrastructure matérielle et logicielle pour le numérique) ont, ainsi, fortement contribué à développer et à fédérer une communauté nationale forte sur ces sujets qui sont aujourd’hui présents au sein du défi “Société de l’information et de la communication” de l’appel à projets générique. Cette communauté nationale a beaucoup d’atouts : équipes académiques alliant maîtrise des outils théoriques et savoir-faire en matière d’architecture et d’expérimentation, équipementiers et systémiers industriels de premier plan, PME technologiques, capacité de mobiliser des expertises pointues allant des composants aux logiciels. Cette communauté a aussi des défis et des opportunités devant elle au sein d’une forte compétition mondiale où les mutations en cours en termes technologiques et de modèles économiques sont propices aux bouleversements des positions des acteurs.

Les infrastructures sont donc à la base de toutes les applications numériques de nos sociétés. Elles sont aussi un lieu de convergence, transverse aux différents secteurs applicatifs. À ce titre, leur valeur ajoutée va aller bien au-delà de “tuyaux de transmission” ou de “machines à calculer” au service d’une application. Par leur positionnement elles sont capables de favoriser les transversalités, de faciliter les services composites partageant les mêmes infrastructures, de rendre disponible de manière contrôlée les données plurielles dont elles disposent (par exemple sur l’environnement et les contextes d’utilisation, sur les statistiques d’usages) pour ouvrir la voie aux développements de nouveaux services innovants. Elles resteront probablement “discrètes” aux yeux des utilisateurs, mais leur rôle sera quantitativement et qualitativement renforcé.

Olivier AUDOUIN et Jean-Luc BEYLAT



5G PPP Vision and Requirements 5G roadmap (Exigences et vision pour l'évolution de la technologie 5G selon le groupe 5G PPP).



Source : 5G Infrastructure Association: 5G Empowering vertical industries White Paper, February 2016.

- 3GPP : **3GPP (3rd Generation Partnership Project)** est une coopération, entre organismes de standardisation en télécommunications, qui produit et publie les spécifications techniques pour les futures générations de réseaux mobiles 3G, 4G, etc.
- 5G PPP : **5G Infrastructure Public Private Partnership**, créé par l'Union Européenne, ce consortium est chargé de préparer l'arrivée de la 5G, qui fera suite à la 4G, d'identifier les verrous technologiques et scientifiques à adresser, et élaborer les standards et brevets nécessaires à son développement.
- ITU : **L'Union internationale des télécommunications (ITU pour International Telecommunication Union)**.
- IMT-2020 : Un groupe de discussion créé par l'UIT pour identifier les besoins de normalisation du réseau pour le développement '5G' des télécommunications mobiles internationales (IMT) à l'horizon 2020 et au-delà.
- RAN : Le Radio Access Network (RAN) est la partie radio d'un système de télécommunication mobile.
- SA : System Aspects, Aspects Système.
- SI : Système d'Information, "Information System".
- ETSI : **L'European Telecommunications Standards Institute (ETSI)**, est l'institut européen de normalisation des télécommunications en Europe. Il est chargé d'élaborer les normes en vigueur en Europe dans le domaine des télécommunications.
- NFV : Network Functions Virtualisation, Virtualisation des Fonctions Réseaux.
- LTE : Long Term Evolution, Évolution à long terme des réseaux de communication mobile. C'est une évolution des normes de téléphonie mobile vers la 4G.
- 5G : **5G** est la cinquième génération de standards pour la téléphonie mobile.
- Req : Requirements, "Exigences".
- Propo : Proposal, Propositions.
- Spec : Specification, "Spécifications".
- WRC : "World Radiocommunications Conference".

THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES

ENJEUX DE RECHERCHE ET APPORTS DES PROJETS SOUTENUS PAR L'AGENCE



Le domaine des infrastructures numériques est au cœur de la montée de la société numérique. De par sa transversalité, il couvre plusieurs champs disciplinaires et porte sur des technologies ayant différents degrés de maturité.

Dans une approche systémique qui ne prétend pas être exhaustive, le domaine des infrastructures numériques est abordé dans ce cahier selon quatre domaines de recherche : infrastructures pour les réseaux du futur, infrastructures pour le HPC et le Cloud, infrastructures de services et enfin composants pour les communications. Les projets financés par l'ANR dans les appels à projets de 2008 à 2011, présentés dans ce cahier, sont classés dans un de ces quatre domaines en fonction de leur objet de recherche.

Ces quatre domaines sont décrits plus en détails dans les sections suivantes par des spécialistes qui en font ressortir les principaux enjeux, les défis et les évolutions futures. Ces spécialistes ont pour la plupart participé à l'évaluation de projets ANR financés dans ces domaines. Ces sections sont également complétées par des informations sur les projets financés par l'ANR entre 2008 et 2011, pour des durées de 42 mois en moyenne.

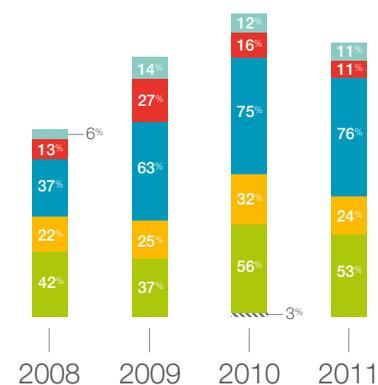
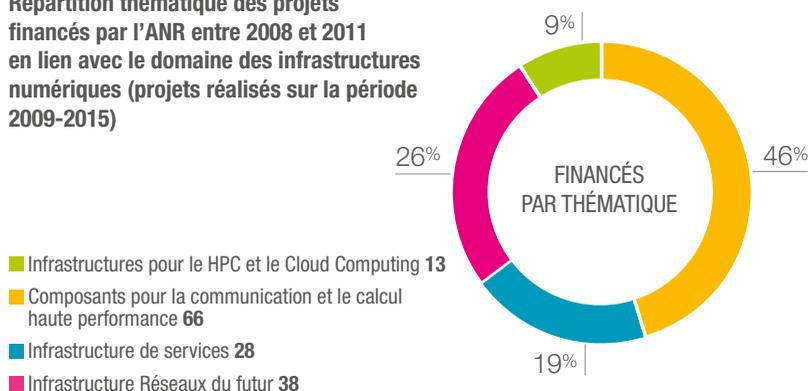
L'ACTION DE L'ANR EN CHIFFRES

DES THÉMATIQUES TRANSVERSES, SOUTENUES À TRAVERS DE MULTIPLES ACTIONS

En cohérence avec l'agenda stratégique national et européen, l'ANR a lancé plusieurs actions programmatiques scientifiques afin de répondre aux défis stratégiques que représentent les infrastructures logicielles et matérielles. Le caractère transversal et l'importance de cette thématique dans le développement de la société numérique, apparaissent dans la diversité et le grand nombre d'actions de l'agence qui ont soutenu des projets de recherche traitant un des aspects sous-jacents au domaine des infrastructures numériques.

La recherche par mots clés dans les titres et les résumés de projets financés par l'ANR entre 2008 et 2011 a permis d'établir une liste, sans qu'elle soit exhaustive, de programmes ANR ayant soutenu la recherche scientifique en lien avec le thème des infrastructures numériques. Cette liste inclut 145 projets issus de 14 programmes, répartis en fonction de leur objet de recherche comme indiqué sur la figure suivante :

Répartition thématique des projets financés par l'ANR entre 2008 et 2011 en lien avec le domaine des infrastructures numériques (projets réalisés sur la période 2009-2015)



Infrastructures matérielles et logicielles : Typologie des bénéficiaires financés par l'ANR entre 2008 et 2011 (projets réalisés sur la période 2009-2015)

- Laboratoires publics 251
- PME 67
- TPE 43
- Entreprises autre que TPE ou PME 103
- Divers public 188
- ▨ Divers privé 3

Les actions lancées par l'ANR ayant donné lieu au soutien de projets de recherche sur la thématique infrastructures matérielles et logicielles sur la période 2008 - 2011.



THÉMATIQUE	PROGRAMME	ÉDITION	ACRONYME
COMPOSANTS POUR LA COMMUNICATION ET LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE	ARPEGE (Systèmes Embarqués et Grandes Infrastructures)	2008	Nanograin
		2009	ARDMAHN
		2009	SecReSoC
		2010	EMYR
		2010	HERODOTOS
		2010	SOBAS
	BLANC	2008	ABSYS
		2009	ASTECAS
		2009	SEDIMOS
		2010	ELECMADE
		2010	INSPIRE
		2010	MIGRAQUEL
		2010	SOLICRISTAL
		2011	LIOM
	Blanc international	2009	COMMAS
		2010	CERISE
		2011	IMAGE-NET
	CHIST-ERA (Era-net)	2011	HIPERCOM
		2011	QINVC
		2011	QScale
		2011	SSQN
	DEFIS (Domaines émergents)	2008	COCQ
	Émergence (Émergence de produits, technologies ou services à fort potentiel de valorisation)	2011	CONNEQT
		2011	SO FAST
	INFRA (Infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique)	2011	CORMORAN
		2011	DIQDOT
		2011	FAON
		2011	HENIAC
	INFRA (Infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique)	2011	JASMIN
		2011	RUBY
		2011	Satellite
		2011	SOCRATE

THÉMATIQUE	PROGRAMME	ÉDITION	ACRONYME
COMPOSANTS POUR LA COMMUNICATION ET LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE		2011	ULTIMATE
	INS (Ingénierie Numérique & Sécurité)	2011	MARS
		2011	Robust FPGA
	JCJC	2008	PARADHOQS
		2008	PROWOC
		2010	SATURN
		2010	SiPowLight
		2011	GOsPEL
	P2N (Nanotechnologies et Nanosystèmes)	2011	COHEDIO
		2011	INSCOOP
		2011	MASSTOR
		2011	NASTAROD
		2011	SPINNOVA
	RPDOC (Retour Post-Doc)	2009	ARCH2NEU
	TTD (Transports Terrestres Durables)	2011	CORRIDOR
	VERSO (Réseaux du Futur et Services)	2008	Robust
		2009	METAVEST
		2009	MICROS
		2009	MODULE
		2009	SILVER
		2009	STRADE
		2009	TELDOT
		2009	THID
		2010	ABSYS 2
		2010	AMORCE
	VERSO (Réseaux du Futur et Services)	2010	EXPRESSO
		2010	GENGHIS Khan
2010		Low.IQ	
2010		OCELOT	
2010		ReAGaN	
2010		TRIMARAN	
2010		UltraWIDE	
VTT (Véhicules pour les Transports Terrestres)	2009	METAPHORT	

THÉMATIQUE	PROGRAMME	ÉDITION	ACRONYME
INFRASTRUCTURE POUR LE HPC ET LE CLOUD COMPUTING	ARPEGE (Systèmes Embarqués et Grandes Infrastructures)	2008	EcoGrappe
		2008	SPADES
		2008	USS-SimGrid
		2010	Aeolus
		2010	MapReduce
		2010	MyCloud
		2010	STREAMS
	BLANC	2009	MCorePHP
		2009	PetaFlow
		2010	ConcoRDanT
	INFRA (Infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique)	2011	SONGS
		2011	SOP
	JCJC	2009	Clouds@home



THÉMATIQUE	PROGRAMME	ÉDITION	ACRONYME
INFRASTRUCTURES DE SERVICES	ARPEGE (Systèmes Embarqués et Grandes Infrastructures)	2008	DEMOTIS
		2008	ITEmis
		2008	Open-PEOPLE
		2008	OPTIMACS
		2009	CESSA
		2009	FAMOUS
		2009	SALTY
		2010	SocEDA
	BLANC	2010	NIS
	CHIST-ERA (Era-net)	2011	ACE
	CONTINT (Contenus Numériques et Interactions)	2009	EULALie 2
		2009	Ex-Deuss
		2010	IMAGIT
		2010	MOANO
	DEFIS (Domaines émergents)	2008	PARTOUT
	Émergence (Émergence de produits, technologies ou services à fort potentiel de valorisation)	2010	AMALYS
	INFRA (Infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique)	2011	Ctrl-Green
		2011	INCOME
		2011	INFRA JVM
	INS (Ingénierie Numérique & Sécurité)	2011	AMORES
		2011	SACSO
	VERSO (Réseaux du Futur et Services)	2008	CONTINUUM
		2008	CROWD
		2008	DATARING
		2009	SWEET-HOME
		2009	VIPEER
		2009	WINGS
2010		PIMI	

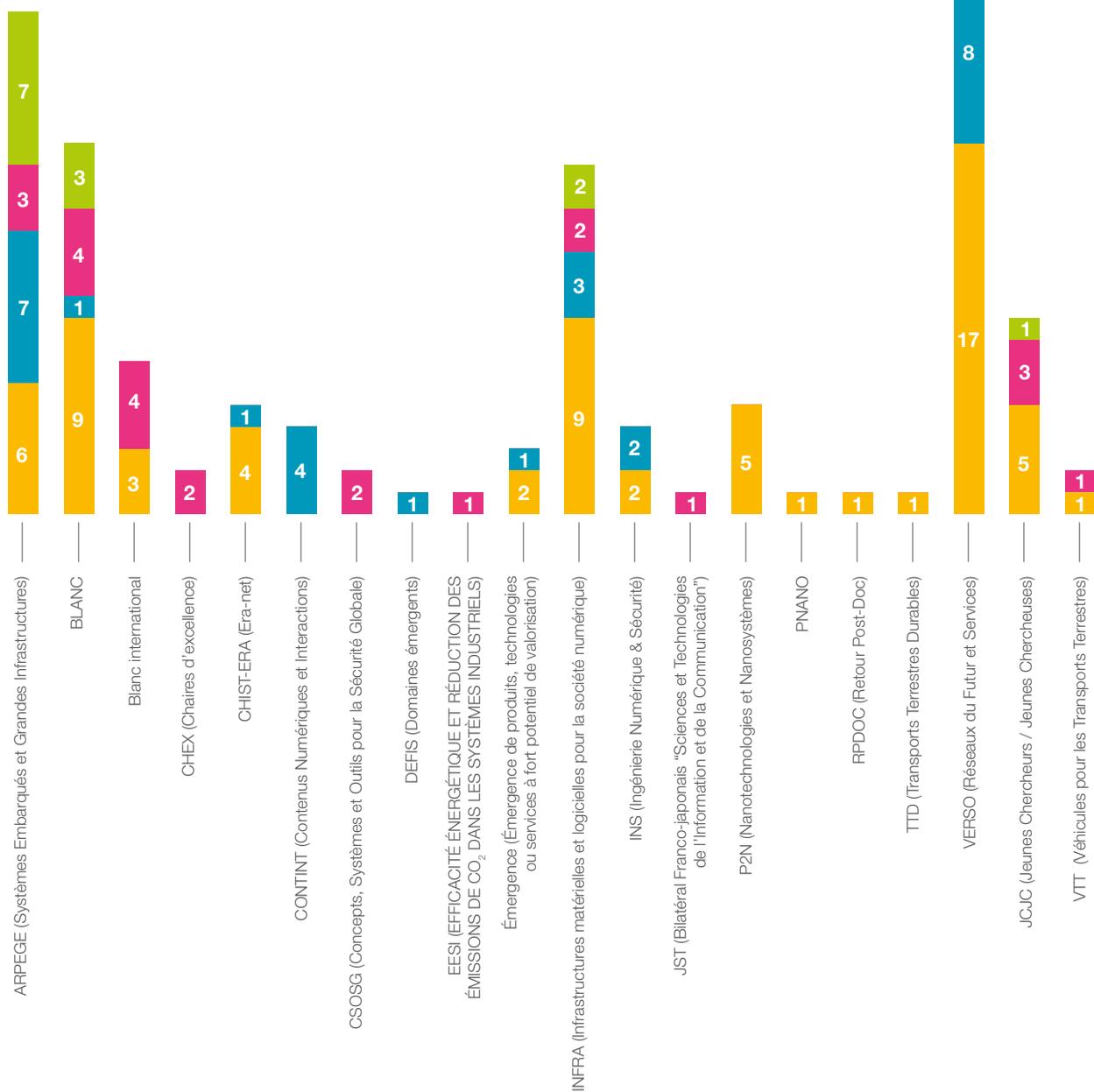
THÉMATIQUE	PROGRAMME	ÉDITION	ACRONYME
INFRASTRUCTURES RÉSEAUX DU FUTUR	ARPEGE (Systèmes Embarqués et Grandes Infrastructures)	2008	SESAM
		2008	SYSRECAP
		2010	GRECO
	BLANC	2009	e-QUANET
		2009	UBIQUEST
		2010	MURPHY
		2010	REC-EM
	Blanc international	2010	CooPerCom
		2010	FIREFLIES
		2010	QUASIMODO
		2011	Greencocom
	CHEX (Chaires d'excellence)	2009	ACE
		2010	SAWTAG
	CSOSG (Concepts, Systèmes et Outils pour la Sécurité Globale)	2011	ANCHORS
	EESI (Efficacité Énergétique et réduction des émissions de CO ₂ dans les Systèmes Industriels)	2010	CHIC
	INFRA (Infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique)	2011	IRIS
		2011	WENDY
	JCJC	2010	TRouP WiIMA
		2011	MIDISTOCK
		2011	REVILABA
	JST (Bilatéral Franco-japonais "Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication")	2010	WITH
	SECU CSOSG (Concepts, Systèmes et Outils pour la Sécurité Globale)	2009	RESCUE-IT
	VERSO (Réseaux du Futur et Services)	2008	ATTITUDE 4G+
2008		CAPTURES	
2008		ELAN	
2008		EPOD	
2008		SHAMAN	
2008		VAMPIRE	

THÉMATIQUE	PROGRAMME	ÉDITION	ACRONYME
INFRASTRUCTURES RÉSEAUX DU FUTUR	VERSO (Réseaux du Futur et Services)	2009	ARESA2
		2009	ARSSO
		2009	BEST
		2009	ECOSCELLS
		2010	CONNECT
		2010	F-Lab
		2010	LICoRNe
		2010	M3
		2010	RESCUE
	VTT (Véhicules pour les Transports Terrestres)	2008	PLATA



La section suivante présente l'ensemble des programmes scientifiques lancés par l'ANR, qui ont permis le financement de ces projets, en lien avec le domaine des infrastructures numériques :

Répartition des thématiques, en lien avec le domaine des infrastructures numériques, soutenues au sein des différentes actions mises en place par l'ANR entre 2008 et 2011 (projets réalisés sur la période 2009-2015)



- Composants pour la communication et le calcul haute performance
- Infrastructures de services
- Infrastructures Réseaux du futur
- Infrastructures pour le HPC et le Cloud Computing

DES ACTIONS THÉMATIQUES DÉDIÉES

Sur la période 2008-2011, l'ANR a lancé deux programmes thématiques triennaux (VERSO et INFRA), dédiés spécifiquement au thème des infrastructures matérielles et logicielles :

Le programme VERSO, initié en 2008, a donné lieu à trois appels à projets (2008, 2009 et 2010) dans le domaine des "Réseaux du Futur et Services". Ces actions ont couvert toutes les recherches visant à produire les infrastructures de réseaux et de services pour la future génération d'applications de communication et de calculs.

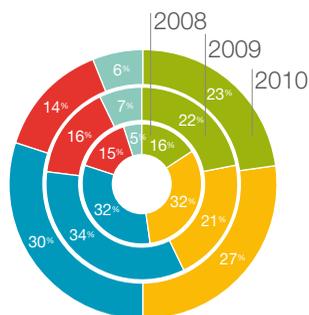
Aussi, les aspects matériels, architecture, logiciels du réseau, usages et déploiement de services, ainsi que les aspects sécurité, ont été abordés dans le cadre du programme VERSO.

Depuis la mise en place en 2013, d'un plan d'action annuel remplaçant les anciens documents de programmation triennaux, ces thématiques de recherche se retrouvent en grande partie dans les axes 7 "Infrastructures de communication, de traitement et de stockage", 3 "Sciences et technologies logicielles", et 8 "Micro et nanotechnologies pour le traitement de l'information et la communication" du défi 7 "Société de l'information et de la communication" de l'actuel plan d'action de l'ANR, ainsi que dans le défi 9 "Liberté et sécurité de l'Europe, de ses citoyens et de ses résidents" pour les sujets portant sur l'aspect sécurité numérique.

Appels à projets VERSO Typologie des partenaires financés

Catégorie du partenaire (nombre de projets)

- Laboratoires publics 87
- PME 41
- TPE 16
- Entreprises autre que TPE ou PME 72
- Divers public 57



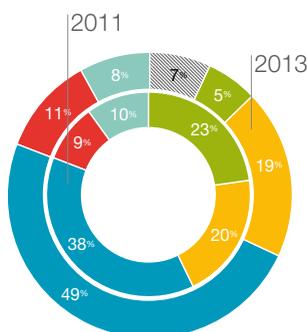
Dans la continuité du programme VERSO, **le programme INFRA** "Infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique" a donné lieu au lancement de deux appels à projets en 2011 et 2013, l'édition 2012 n'ayant pu être ouverte du fait de réductions budgétaires. Ce programme a soutenu la recherche dans des domaines des infrastructures matérielles et logicielles pour l'internet du futur, l'intelligence ambiante, les nouveaux services et modes d'utilisation associés, le calcul et le stockage haute performance et la disponibilité ubiquitaire des données, informations et contenus multimédia.

À l'instar du programme VERSO, les axes thématiques d'INFRA se retrouvent principalement dans les axes 7 "Infrastructures de communication, de traitement et de stockage", 3 "Sciences et technologies logicielles", et 8 "Micro et nanotechnologies pour le traitement de l'information et la communication" du défi 7 "Société de l'information et de la communication" de l'actuel plan d'action de l'agence. En revanche, les projets traitant des aspects "Sécurité" répondraient plus aux sujets traités dans le défi 9 "Liberté et sécurité de l'Europe, de ses citoyens et de ses résidents" du plan d'action.

Appels à projets INFRA Typologie des partenaires financés

Catégorie du partenaire (nombre de projets)

- Laboratoires publics 66
- PME 15
- TPE 14
- Entreprises autre que TPE ou PME 30
- Divers public 22
- ▨ Divers privé 5



VERSO EN CHIFFRES

52 PROJETS FINANCÉS

UNE AIDE ANR TOTALE DE

54,2 M€

- EN 2008 18,1M€
- EN 2009 20,1M€
- EN 2010 16 M€

INFRA EN CHIFFRES

30 PROJETS SOUTENUS



UNE AIDE ANR TOTALE DE

28,5 M€

- EN 2011 17,2M€
- EN 2013 11,3M€

DES ACTIONS PLUS LARGES, INTÉRESSANT NOTAMMENT LE DÉVELOPPEMENT DE BRIQUES TECHNOLOGIQUES POUR LES INFRASTRUCTURES NUMÉRIQUES

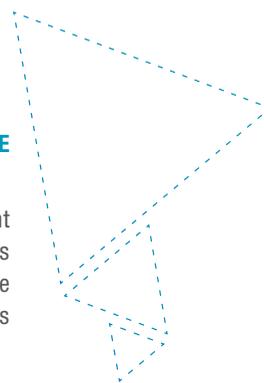
En plus des deux programmes précités VERSO et INFRA, d'autres programmes ont également permis le financement de projets de recherche pour le développement de briques technologiques pour les infrastructures numériques. Nous présentons ci-après une liste de programmes dans lesquels la problématique de l'infrastructure a été traitée de manière plus ou moins importante :

- Le programme **ARPEGE** "Systèmes Embarqués et Grandes Infrastructures", ouvert de 2008 à 2010, s'est intéressé à **l'évolution des systèmes à petite échelle** (systèmes embarqués), mais aussi aux **très grandes infrastructures distribuées**. Parmi les objectifs de cette action, figure la levée des verrous liés à l'augmentation rapide du nombre de calculateurs, du volume des données manipulées, du nombre d'utilisateurs en interaction sur le web et la nécessité de maîtriser la consommation énergétique. Les axes thématiques soutenus dans le cadre du programme ARPEGE apparaissent désormais dans les axes 3 "Sciences et technologies logicielles", 7 "Infrastructures de communication, de traitement et de stockage", 4 "Interactions, Robotique, Contenu", 6 "Simulation numérique : du calcul intensif aux données massives", et 8 "Micro et nanotechnologies pour le traitement de l'information et la communication" du défi 7 du plan d'action de l'ANR, ainsi que dans le défi 9.
- Le programme **INS 2011** "Ingénierie Numérique et Sécurité", suite partielle du programme ARPEGE, a appuyé l'effort national en R&D sur le thème des **technologies pour l'embarqué**. Il a visé la conception de systèmes numériques fiables basés sur de nouveaux paradigmes comme l'éco-design, le co-design matériel/logiciel, les composants et architectures reconfigurables, ou encore l'autonomie au sens large. Les enjeux ciblés par ce programme figurent principalement dans les axes 3 "Sciences et technologies logicielles" et 7 "Infrastructure de communication, de traitement et de stockage" du défi 7, ainsi que dans le défi 9 "Liberté et sécurité de l'Europe, de ses citoyens et de ses résidents" du plan d'action de l'ANR.

Les infrastructures numériques ont également, par certains de leurs aspects, été abordées et soutenues par d'autres programmes de l'agence :

- Le programme P2N "**Programme Nanosciences, Nanotechnologies**", lancé en 2008 pour une durée de 3 ans, s'est articulé autour des priorités scientifiques en lien avec les "micro et nanotechnologies". Il a généré des avancées dans l'utilisation des nanotechnologies pour les composants et les microsystèmes intégrés et en réseau.

Cette thématique est aujourd'hui traitée dans l'axe 8 "Micro et nanotechnologies pour le traitement de l'information et la communication" du défi 7 "Société de l'information et de la communication".



ARPEGE EN CHIFFRES

3 
APPELS À PROJETS

48 M€

60
PROJETS SOUTENUS RÉUNISSANT

- LABORATOIRES PUBLICS 105
- PME 26
- TPE 27
- ENTREPRISES AUTRES QUE TPE OU PME 48
- DIVERS PUBLIC 94

INS 2011 EN CHIFFRES

16
PROJETS DE RECHERCHE



12 M€

- LABORATOIRES PUBLICS 36
- PME 2
- TPE 3
- ENTREPRISES AUTRES QUE TPE OU PME 13
- DIVERS PUBLIC 19
- DIVERS PRIVÉ 2

- Le programme **CONTINT** “Contenus Numériques et Interactions”, également lancé en 2008 a concerné toute la chaîne des contenus numériques. Trois appels à projets ont été lancés dans ce cadre pour lever, entre autres, les verrous liés aux interactions entre le monde physique et virtuel dans un contexte mobile. Il traite ainsi en partie des problématiques technologiques et systèmes pour l'accès et l'échange de contenus qui font appel au déploiement d'infrastructures numériques du futur.

Les thématiques de ce programme sont désormais soutenues dans l'axe 4 “Interactions, Robotique, Contenus” et l'axe 5 “Données, Connaissances et Données massives (Big Data)” du plan d'action 2016.

En complément de ces programmes thématiques, l'ANR a proposé, depuis 2008, des programmes ouverts à toutes les disciplines scientifiques afin d'encourager les travaux scientifiques parfois exploratoires à la frontière de disciplines et domaines de la connaissance.

- Le **programme Blanc**, avec une ouverture à l'international, a contribué au financement de la recherche pluridisciplinaire sur le thème des infrastructures du numérique. Ainsi de nombreux projets ont été portés par des équipes interdisciplinaires pour relever les défis des infrastructures numériques dans un contexte scientifique ou socio-économique très large. Certaines de ces équipes ont poursuivi leurs collaborations et ont répondu à des appels à projets de programmes thématiques dédiés aux infrastructures matérielles et logicielles.
- Le programme **Jeunes chercheuses / Jeunes chercheurs** (JCJC) destiné aux jeunes chercheurs dans le secteur “Sciences de l'information, de la matière et de l'ingénierie” (SIMI) a favorisé la prise d'autonomie scientifique et l'émergence de nouvelles équipes travaillant sur des aspects exploratoires des infrastructures numériques. Cet outil est toujours proposé par l'ANR dans le cadre de l'actuel appel à projets générique.

La recherche dans le domaine des infrastructures numériques est également financée dans le cadre des programmes internationaux de l'ANR :

- L'action européenne **CHIST-ERA** (European Coordinated Research on Long-term Challenges in Information and Communication Sciences & Technologies ERA-NET) coordonnée depuis 2009 par l'ANR, regroupe un consortium de douze pays européens autour des défis à long terme dans le domaine des sciences et technologies de l'information et de la communication. L'objectif de cet ERA-NET (European Research Area Network) est de développer la coordination et la coopération des agences de financement de la recherche en Europe, sur des sujets émergents et prometteurs du domaine des STIC. À travers ce programme européen, l'ANR a participé au soutien de la recherche française dans plusieurs champs thématiques en lien avec les infrastructures pour le numérique (<http://www.chistera.eu/>).
- Le programme bilatéral **ANR-JST** a été lancé en 2010 par la France et le Japon dans le domaine des Sciences et technologies de l'information et de la communication, des nanotechnologies et de leurs usages (4 projets pour 2,9 M€ d'aide attribuée). Il a permis notamment la réalisation du projet WITH qui apporte des réponses aux besoins de la société en termes de communication sans fil à très haut débit et propose des solutions concrètes pour améliorer la vitesse de transmission des données Wi-Fi.



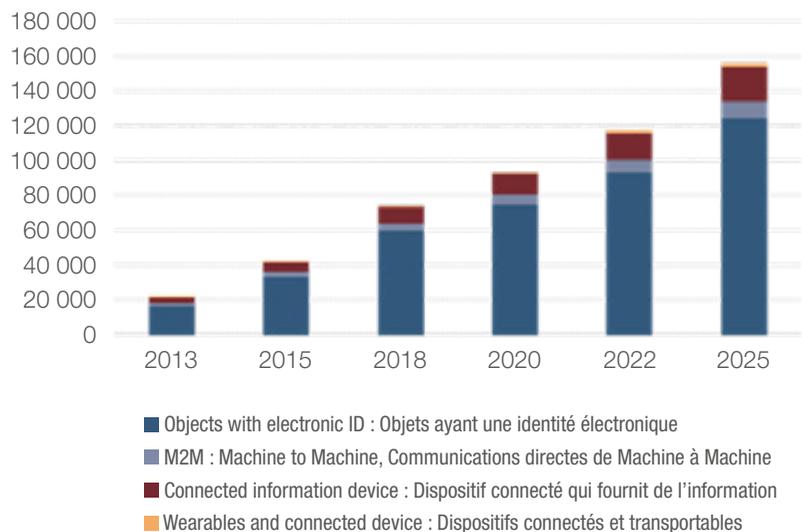
INFRASTRUCTURES POUR LES RÉSEAUX DU FUTUR

ENJEUX STRATÉGIQUES DES INFRASTRUCTURES POUR LES RÉSEAUX DU FUTUR

Le contexte semble évident et limpide de nos jours : le monde et nos sociétés sont devenus numériques. Il ne fait aucun doute que les sciences et technologies de l'information et de la communication sont au cœur de toutes les activités humaines, économiques, scientifiques et industrielles. En ce sens, les "sciences du numériques" jouent un rôle prépondérant et stratégique dans l'accélération des technologies, des progrès scientifiques, dans les gains de productivité et de croissance. L'un des leitmotivs est la modification profonde de l'économie, au sens le plus large, qui est survenue suite à l'avènement des nouvelles infrastructures et modalités pour communiquer, interagir et produire. La communication et donc les réseaux sont au centre de toutes ces évolutions. Nul ne s'étonne de vivre dans un monde ubiquitaire en plein essor. C'est pourtant bien grâce aux sciences et technologies de l'information et de la communication que la mobilité et le nomadisme sont possibles tout en offrant une connexion tout le temps, partout et à partir de n'importe quel terminal ("*AnyTime, AnyWhere, AnyDevice*").

Objects with electronic ID as a leading concept, by volume (million 'things')

Objets avec un concept d'identité électronique, par volume (en millions "objets")



Source : IDATE, market report Internet of Things, October 2015

Pour tenter de mesurer les enjeux qui s'offrent dans ce monde qui s'ouvre vers l'Internet Of Things (IoT, ou "internet des objets"), le cloud et plus généralement l'internet du futur, on peut se retourner et regarder dans le passé jusqu'à l'avènement d'Internet Protocol (IP) et d'Internet, disons dans les années 80/90. On peut tenter d'en tirer 2 leçons au sens de constante historique. IP s'est imposé comme "le protocole mondial" devant d'autres prétendants comme X25, Frame Relay, ATM alors qu'il était, et reste, un protocole sans réservation ni garantie de service. Dans le même temps, il s'est imposé dans les réseaux d'entreprises devant des offres comme IPC, NetBios alors qu'il n'offre ni découverte de service ni auto configuration. Plus récemment, IP s'est imposé dans le monde de la téléphonie et de la télévision. La première leçon est une évidence, mais nous révèle que la valeur d'un réseau, et donc son succès



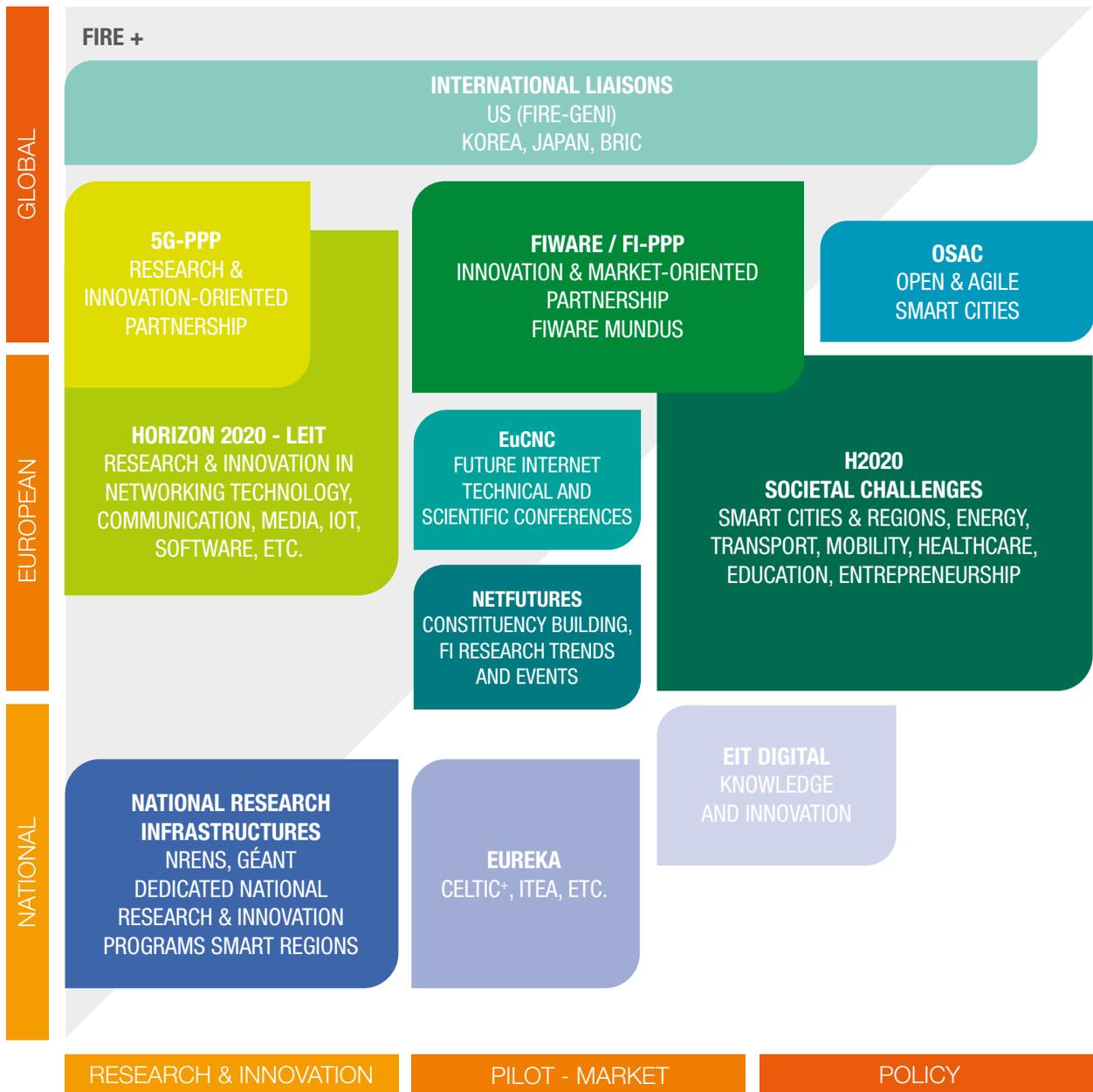
provient de ses interconnexions ! La seconde leçon nous apprend que ces interconnexions sont basées et grandement favorisées par l'adoption de protocoles ouverts. IP et Internet ne sont et ne doivent pour autant pas être immuables. Un paradoxe est peut-être que pour la plupart de ses usages et de ses utilisateurs, l'internet fonctionne assez bien alors que son architecture a fort peu changé en près de 40 ans et qu'il est nécessaire de réfléchir à ces évolutions pour aborder les enjeux qui sont inhérents et regroupés sous le terme générique de "réseaux du Futur".

Notons que tous les pays ont mis en œuvre des programmes sur la thématique générale des réseaux. Sans en faire une liste exhaustive, les USA ont lancé GENI (*Global Environment for Network Innovations*), un laboratoire virtuel pour la recherche et la formation en réseaux, systèmes distribués, sécurité, et expérimentation à large échelle afin de promouvoir l'innovation et l'expérimentation dans ces domaines. La Chine possède aussi un plan d'action au plus haut niveau nommé "Internet Plus" qui se décline auprès de toutes les agences. L'objectif général d'Internet+ est de promouvoir l'innovation à tous les niveaux du réseau, et de supporter les nouveaux usages dans tous les secteurs. Ce plan vise à intégrer l'internet mobile, l'informatique en nuage, les mégadonnées et l'internet des objets à la fabrication moderne, afin de promouvoir le développement du commerce électronique, des réseaux industriels et des services bancaires en ligne et d'aider les sociétés en ligne à renforcer leur présence internationale afin de stimuler la croissance économique.

Le Japon, via le *Ministry of Internal Affairs and Communications* (MIC) a lancé une initiative nommée "*The Ideal State of Information and Communications Policies toward the 2020s: For the Further Spread and Development of Information and Communications Infrastructure at the World's Highest Level*". Le but annoncé est de promouvoir l'économie et d'améliorer la qualité de vie des citoyens au travers du développement et du déploiement d'infrastructures de communication de nouvelle génération. Ce plan se décline en plusieurs volets sur les technologies filaires, le développement des technologies sans fil, la sécurité et la sûreté des infrastructures. Pour terminer ce rapide tour d'horizon non exhaustif, la commission européenne au travers du plan i2010 met l'accent sur l'Europe numérique et l'internet avec une emphase dans le plan i2010 sur la mobilité et les infrastructures attenantes, sur les systèmes de média en réseau, l'architecture P2P et le cloud, sur l'IoT. Plus récemment, le programme H2020 met l'emphase sur l'internet du futur qui comprend un volet spécifique sur la validation des résultats de recherche au travers d'expérimentation très large échelle sur des infrastructures expérimentales - *Federated Experimental Infrastructure for Future Internet Research & Experimentation* (FIRE+). Le programme H2020 met l'emphase sur l'IoT en souhaitant créer des écosystèmes de plates-formes devant intégrer les futures générations d'objets embarqués pour soutenir l'émergence de solution IoT à base de technologies ouvertes. Le programme H2020 met également en avant la 5G, notamment au travers de l'initiative 5G *Public-Private Partnership* (5G PPP) afin d'assurer à l'Europe un leadership sur les secteurs où nous sommes en pointe et où il y a un très fort potentiel de création comme les villes intelligentes, e-santé, les transports intelligents, l'éducation ou encore le secteur du divertissement & media. H2020 soutient aussi fortement le Cloud Computing en souhaitant renforcer et développer des solutions efficaces et sécurisées, garantissant une protection de la vie privée.

Positioning FIRE in a wider scale.

Positionnement du projet FIRE dans son contexte large.



FIRE "Federated Experimental Infrastructure for Future Internet Research & Experimentation"

- International liaisons : liaisons internationales
- 5G-PPP Research & innovation-oriented partnership : 5G-PPP Partenariat orienté Recherche et Innovation
- Innovation & market-oriented partnership : Partenariat orienté Recherche et Innovation
- Open & Agile Smart Cities : Ville intelligente
- Horizon 2020 - LEIT Research & innovation in networking technology, communication, Media, IoT, software, etc. : Horizon 2020 - LEIT Recherche et Innovation dans les technologies des réseaux de communication, des médias, de l'internet des objets, du logiciel, etc.
- Future Internet technical and scientific conferences : Conférences scientifiques et techniques pour l'internet du futur
- H2020 Societal challenges (Cities & Regions, energy, transport, mobility, healthcare, education, entrepreneurship) : H2020 Défis sociétaux (Villes Intelligentes, Énergie, Transport, Mobilité, Santé, Éducation, Entrepreneurship)
- NetFutures : Constituency building, FI research trends and events : NetFutures Identification des périmètres, des tendances et des verrous de recherche de l'Internet du Futur (FI)
- National Research Infrastructures NRENS, Géant Dedicated national research & innovation programs Smart Regions : Infrastructure de Recherche Nationale NRENS, GEANT Recherche nationale dédiée & Programme d'innovation sur les "Smart Regions"
- Knowledge and Innovation : Connaissances et Innovations
- RESEARCH & INNOVATION : Recherche & Innovation
- Pilot - Market : Marché - Pilote
- Policy : Politique

CONTRIBUTION DES PROJETS FINANCÉS PAR L'ANR

Dès 2008 avec l'appel, VERSO puis au sein des appels INFRA, un des défis identifiés et mis en avant par l'ANR est de produire les infrastructures de réseaux que l'on qualifie alors d'"omniprésents, convergents et inter-opérants" pour ce qui va s'appeler dès 2009 les "réseaux du futur". Ceux-ci doivent prendre en compte l'intégration d'entités multiples et hétérogènes, fixes ou mobiles, avec de fortes contraintes en énergie et des objectifs de qualité de service et de performance accrue. On parle déjà d'accès à l'information du contenu et d'analyse de sémantique des échanges, de virtualisation, d'autoconfiguration et d'autonomie pour appréhender la complexité de la gestion de ces réseaux du futur. L'évolution qui s'est dessinée en moins de quatre ans est le passage de problématiques qui, dans les années 2008, étaient encore très centrées sur l'interopérabilité et la convergence de toutes les couches réseaux développées et conçues de façon indépendantes (on parlait encore du monde des télécoms et du monde de l'internet), vers des problématiques résolument tournées vers les réseaux du futur en rupture avec les problématiques de convergence et dont les défis sont devenus l'intégration massive d'éléments multiples et hétérogènes avec de fortes contraintes de qualité de services, d'énergie, de mobilité et de performance. Le contenu et la donnée sont à nouveau au cœur, et on parle d'internet polymorphe devant donner naissance à de nouveaux usages, services au-delà des modèles d'adressage et de communication connus. Cette évolution a aussi été marquée par une évolution des services qui remettent l'utilisateur au centre, à des services plus personnalisés, adaptables jusqu'à leur virtualisation et à la notion centrale depuis les années 2010 de réseaux sociaux présents dans toute application connectée et mobile.

Ces grands défis ont été relevés par les nombreux projets financés grâce au soutien de l'ANR entre 2008 et 2011. Le large spectre des projets financés a permis de répondre aux nombreux défis que l'on a regroupés sous le défi ambitieux des réseaux du futur. Sans en faire la liste exhaustive ici, nous pouvons citer quelques thèmes de ce large spectre.

Sur le plan des réseaux cellulaires, des projets ont étudié la 4G, la diffusion de flux multimédia (M3), la coopération entre micro-cellules (ECOSCELLS), les communications coopératives au moyen de stations de relais déployées au bord des cellules afin d'apprendre les interférences et d'aider les communications simultanées (FIREFLIES) et l'assistance aux conducteurs avec des réseaux capables de gérer les communications de véhicule à véhicule et de véhicule vers l'infrastructure (PLATA). Le projet WENDY

CHIFFRES CLÉS DE L'ACTION DE L'ANR (2008-2011)

DOMAINE DES INFRASTRUCTURES POUR LES RÉSEAUX DU FUTUR

11

PROGRAMMES SCIENTIFIQUES
LANCÉS PAR L'ANR

38

PROJETS FINANCÉS

EN MOYENNE :

4,3

PARTENAIRES
PAR PROJET

823 K€

D'AIDE ALLOUÉE

AU TOTAL :

- UN SOUTIEN FINANCIER APPORTÉ À PLUS DE :

57

LABORATOIRES
PUBLICS

43

PARTENAIRES
DE CATÉGORIE
"DIVERS PUBLIC"

59

ENTREPRISES

- 23 PME
- 3 TPE
- 33 ENTREPRISES AUTRES QUE TPE ET PME

- LA PRODUCTION DE :

317

PUBLICATIONS DANS
DES REVUES AVEC
COMITÉ DE LECTURE

749

COMMUNICATIONS
DANS DES
CONFÉRENCES
INTERNATIONALES

27

PROJETS SUITE

34

BREVETS

3

DÉPÔTS DE BREVETS

2

CRÉATIONS
DE NOUVELLES
ENTREPRISES

a démontré la réception de données ultra-haut-débit et le projet WITH a développé, via des transmissions sans fils basées sur de nouvelles ondes (les ondes Téràhertz), des systèmes capables d'aller environ 1000 fois plus vite que le Wi-Fi.

Dans le domaine de l'Internet du futur, le projet UBIQUEST a étudié les protocoles orientés données pour des réseaux sans fil multi-sauts afin de considérer le réseau comme une base de données distribuées pour que la gestion du réseau et des données soit réalisée au travers de requêtes distribuées et le projet VAMPIR s'est penché sur les problématiques de la sécurité et de la vulnérabilité de l'Internet du Futur. Le projet CONNECT a œuvré sur la conception et l'analyse de performance d'une architecture centrée sur le contenu. D'autres projets se sont intéressés à des défis plus économiques comme la modélisation de l'économie des réseaux télécommunication (CAPTURES) due notamment à la compétition entre opérateurs, aux problématiques du multimédia dans les réseaux mobiles.

Dans le domaine de l'IoT et des réseaux de capteurs, les aspects de la sécurité des systèmes embarqués coopératifs ont été examinés notamment au travers de l'étude de la gestion des données incertaines et de la fusion de données dynamiques et coopératives pour l'estimation du risque global (CooPerCom). Le projet ARESA2, quant à lui, a étudié comment immerger dans Internet les réseaux de capteurs multi-sauts en offrant une garantie de résilience à un coût énergétique maîtrisé. Des projets ont étudié les problématiques du transport et du routage dans les réseaux tolérants au délai et opportunistes (PROSE, CROWD), dans les réseaux dit ad hoc en prenant en compte la mobilité des usagers (TRouP WiIMA) ou afin d'être en mesure de déployer un réseau de substitution composé d'une flotte de routeurs mobiles sans fil pour pallier les défaillances du réseau d'infrastructure (RESCUE). La problématique du "green" a été étudiée par la conception de systèmes communicants autonomes en énergie, le développement de micro-dispositifs innovants de stockage de l'énergie embarquée, la récupération de l'énergie électromagnétique et dans le contexte des réseaux corporels (CORMORAN, e-QUANET, MIDISTOCK, REC-EM, RUBY).

Dans le domaine des protocoles quantiques de communication et de traitement de l'information le projet E-QUANET a permis de repousser l'état de l'art dans l'application des réseaux quantiques.

Pour terminer, l'ANR a accompagné et encouragé les initiatives stratégiques pour supporter la validation des résultats de recherche au travers d'expérimentations à très large échelle sur des infrastructures expérimentales. Plusieurs projets de plateforme ouverte à l'ensemble de la communauté (F-LAB) ont été soutenus dans les domaines de l'IoT ou de l'Internet du Futur. Ces projets dits "plateformes" sont, pour la plupart, regroupés au sein de la fédération Future Internet of Things (Equipex FIT) permettant d'offrir un service unique pour l'expérimentation de services innovants pour l'Internet du futur. Tous ces projets ont permis des avancées innovantes, mesurables, et reconnues dans le domaine très large des "Infrastructures pour les réseaux du futur".

Il reste des défis et des opportunités scientifiques majeures pour les systèmes et les technologies de communication de demain : les réseaux au Terabits/sec, le support effectif, interopérable de la virtualisation des réseaux et des infrastructures, les protocoles, le déploiement des réseaux sans fil pervasif, la prise en compte de l'IoE (Internet of Everything). Il faut aussi veiller à transformer les essais en terme de standardisation et de normalisation et soutenir des recherches toujours plus inter et pluri disciplinaires car l'implication de la société dite "civile" est une nécessité absolue dans des domaines comme la ville connectée par exemple. L'enjeu est de favoriser l'ouverture des sciences du numérique et de la communication vers les sciences humaines et sociales dans une réelle synergie afin de construire une vision globale du numérique qui ne se réduit pas à une approche purement technologique, mais qui adopte une approche intégrative afin de comprendre et maîtriser les enjeux des nouveaux flux de données massifs et de comprendre et développer les objets communicants du numérique.

Notons que l'État a effectué sur la période une consultation publique sur l'internet du futur (organisée en 2009 par le secrétariat d'État chargé de la Prospective et du développement de l'économie numérique) dont l'objectif est "la définition d'un plan d'actions destiné à positionner la France dans le développement de l'internet du Futur, et favoriser ainsi les retombées économiques et industrielles pour notre pays". Plus récemment, en 2015, le gouvernement a dévoilé son projet de loi pour une République Numérique et appelé les citoyens à co-construire cette loi avec notamment des articles suggérant une position forte de la France dans les instances de gouvernance de l'internet mondial afin d'en assurer la neutralité.







Nuage de mots issu des résumés de projets financés sur le thème des infrastructures pour le HPC et le Cloud entre 2008 et 2011

INFRASTRUCTURES POUR LE HPC ET LE CLOUD



Ce domaine de recherche vise à adresser toutes les problématiques en rapport avec le développement de nouvelles architectures de calculateurs à très hautes performances capables de supporter l'augmentation massive des données et de les exploiter dans des temps réduits. Il s'agit également d'accompagner la montée en puissance du Cloud Computing qui devient de plus en plus le modèle de référence. L'ANR a financé plus de treize projets, entre 2008 et 2011, qui ont traité les problématiques liées à la gestion et au stockage des données, à la gestion des ressources, aux nouvelles architectures multi-cœurs, aux systèmes distribués à grande échelle, à la gestion de l'énergie, au passage à l'échelle, etc.





INFRASTRUCTURES POUR LE HPC ET LE CLOUD

INFRASTRUCTURES POUR LE HPC

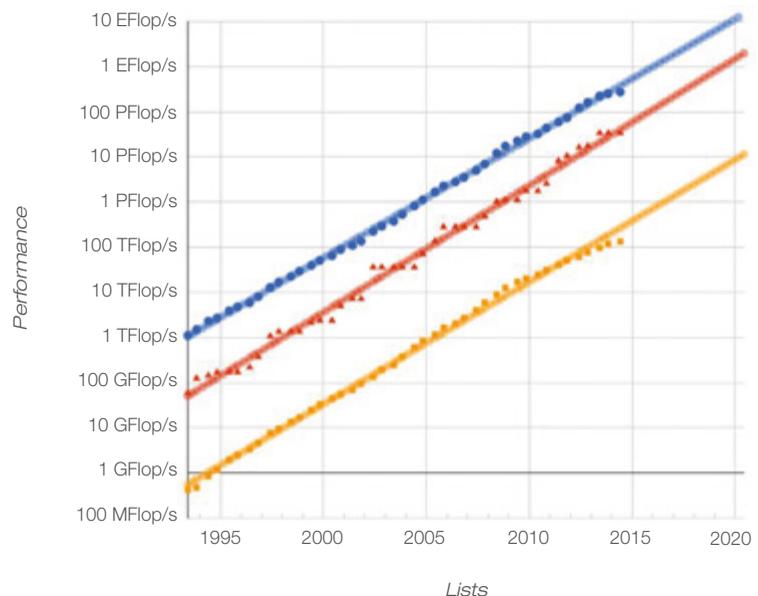
Dans le domaine du calcul haute performance (HPC) les évolutions restent toujours très rapides. Entre 1986 et 2002, la performance des processeurs a augmenté en moyenne de 50% par an. Depuis 2002, ces gains de performance ont chuté à une augmentation moyenne de 20% par an. La loi de Moore qui explique en grande partie ces évolutions et qui prédit que le nombre de transistors dans un circuit double environ tous les 2 ans s'est révélée exacte jusqu'à aujourd'hui. On peut toutefois anticiper le basculement proche dans une ère post-Moore dès que l'on sera confronté à des effets quantiques issus d'une intégration très poussée (le mur de 20 nm pour la dimension des transistors CMOS "Complementary metal oxide semi-conductor" dans l'industrie).

PUISSANCE DES SUPERCALCULATEURS ET ÉVOLUTION HISTORIQUE

Pendant longtemps les gains en puissance des supercalculateurs furent induits par l'accroissement de la fréquence d'horloge des processeurs. Depuis 2004, cette fréquence tend à stagner voire à baisser dans les processeurs multi-cœurs récents en raison des problèmes de dissipation thermique. Sur les dix dernières années la progression des performances provient essentiellement de l'exploitation à la fois d'un nombre plus élevé de processeurs et de nœuds de calcul dans les architectures ainsi que d'un nombre toujours croissant de cœurs de calcul dans les processeurs ou dans les "accélérateurs" dont l'usage se répand. Autrement dit, on assiste à l'adoption d'architectures à grand nombre de cœurs du type Intel MIC (Many Integrated Cores) qui rassemblent de nombreux cœurs Intel sur une même puce (par exemple Xeon Phi) ou GPGPU (General Purpose computing on Graphics Processing Units) qui peuvent compter jusqu'à 2880 cœurs pour le NVIDIA K40 Tesla affichant une performance de crête de 1,43 Tflops (mille milliards d'opérations par seconde) en double précision. Soit une évolution vers des calculateurs hétérogènes mélangeant des processeurs multi-cœurs "classiques" et des "accélérateurs".

Projected Performance Development

Développement prévisionnel des performances



Source TOP 500

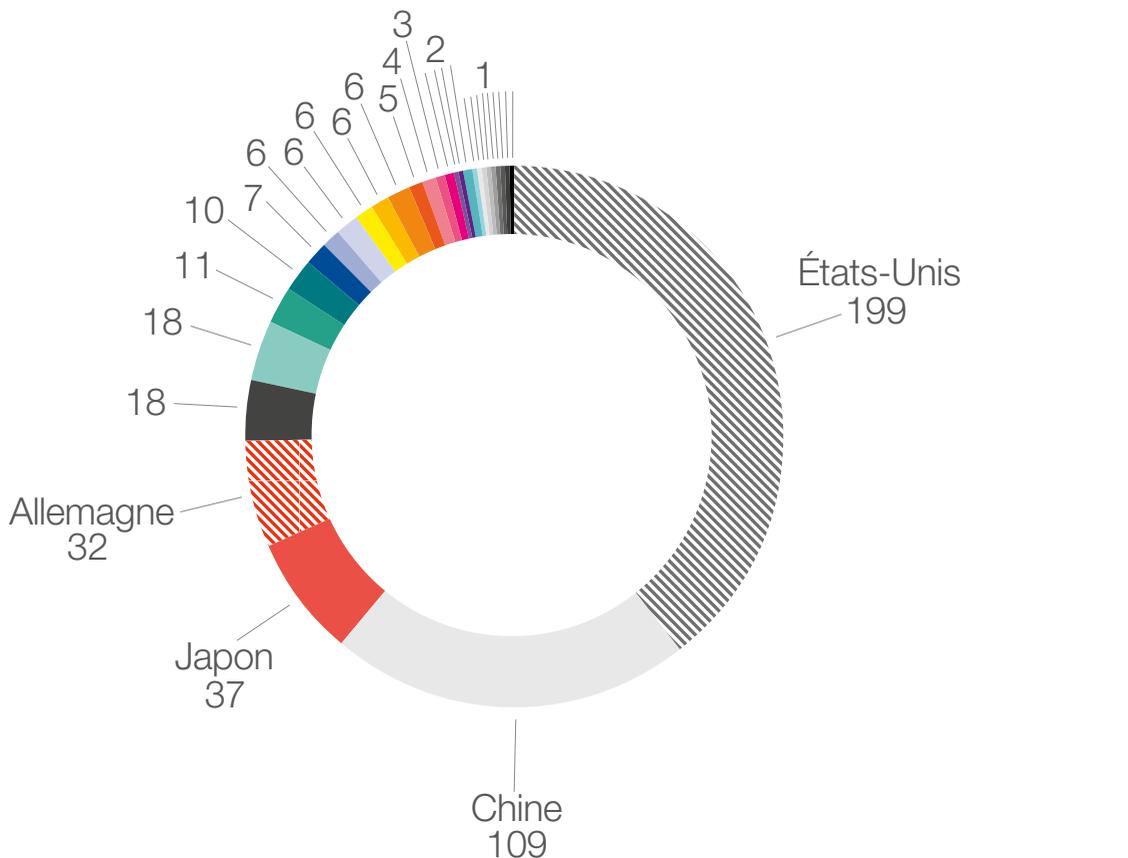
■ Somme ■ #1 ■ #500



Depuis les années 80, un ordre de grandeur est franchi dans la performance des supercalculateurs tous les 10 ans environ : le gigaflops (milliard d'opérations flottantes par seconde) en 1985 avec le CRAY-2 (USA), le téraflops (mille milliards d'opérations flottantes par seconde) en 1997 avec l'ASCI Red (USA), et enfin le pétaflops (dix millions d'opérations flottantes par seconde) en 2008 avec Roadrunner (USA).

Dans le classement des calculateurs les plus puissants, le TOP500 de novembre 2008 (cf top500.org), la machine la plus puissante (Roadrunner à Los Alamos) ayant été la première à avoir dépassé le PétaFlops (1,1 PétaFlops) sur le benchmark LINPACK, était composée de 6480 cœurs Opteron et 129600 processeurs Cell pour une puissance de crête de 1,46 PétaFlops et une consommation de 2,5 MW. Actuellement la machine la plus puissante, Tianhe-2 installée à Guangzhou, affiche une performance de crête de l'ordre de 55 PétaFlops pour une consommation de 17,8 MW avec 16,000 nœuds de calcul comprenant chacun 2 Intel Xeon Ivy Bridge et 3 co-processeurs Xeon Phi soit 3120000 cœurs pour une performance de crête d'environ 55 PétaFlops. On constate également la quasi disparition des configurations à base de processeurs AMD dans le TOP10 du TOP500 entre 2008 et 2015 et l'apparition du SPARC64 sur la machine K à Riken. L'une des tendances actuelles, en plus de l'utilisation des accélérateurs, est aussi de considérer l'utilisation de processeurs ARM qui affichent des caractéristiques intéressantes en termes de consommation.

Localisation des supercalculateurs du top 500 (novembre 2015)



Source : www.top500.org

- ▨ États-Unis 199
- ▬ Chine 109
- Japon 37
- ▨ Allemagne 32
- France 18
- Royaume-Uni 18
- Inde 11
- Corée du Sud 10
- Russie 7
- Arabie saoudite 6
- Suisse 6
- Brésil 6
- Canada 6
- Pologne 6
- Australie 5
- Italie 4
- Suède 3
- Danemark 2
- Espagne 2
- Pays-Bas 2
- Finlande 2
- Croatie 1
- Hong Kong 1
- Hongrie 1
- Bulgarie 1
- Mexique 1
- Norvège 1
- Nouvelle-Zélande 1
- Autriche 1
- République tchèque 1

Les 8 supercalculateurs les plus puissants au monde (novembre 2015)

RANK	SITE	SYSTEM	CORES	RMAX (TFLOP/S)	RPEAK (TFLOP/S)	POWER (KW)
1	Doe/Sc/Oak Ridge National Laboratory United States	Titan - Cray XK7, Opteron 6274 16C 2.200 GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA k20x Cray Inc.	560640	17590.0	27112.5	8209
2	DOE/NNSA/LLNL United States	Sequoia - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1572864	16324.8	20132.7	7890
3	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	K computer, SPARC64 VIIIfx 2.0 GHz, Tofu interconnect Fujitsu	705024	10510.0	11280.4	12660
4	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	Mira - BlueGene/Q Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	786432	8162.4	10066.3	3945
5	Forschungszentrum Juelich (FZJ) Germany	JUQUEEN - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.600 GHz, Custom Interconnect IBM	393216	4141.2	5033.2	1970
6	Leibniz Rechenzentrum Germany	SuperMUC - iDataPlex DX360M4, Xeon E5-2680 8C 2.70 GHz, Infiniband FDR IBM	147456	2897.0	3185.1	3423
7	Texas Advanced Computing Center/ Univ. of Texas United States	Stampede - PowerEdge C8220, Xeon E5-2680 8C 2.700 GHz, Infiniband FDR, Intel Xeon Phi Dell	204900	2660.3	3959.0	
8	National Supercomputing Center in Tianjin China	Tianhe-1A - NUDT YH MPP, Xeon X5670 6C 2.93 GHz, NVIDIA 2050 NUDT	186368	2566.0	4701.0	4040

Source : Green500



DÉFIS DU PASSAGE PÉTAFLOPS / EXAFLOPS

Depuis 2010, l'objectif affiché est de franchir la barre de l'ExaFlops (milliard de milliards d'opérations flottantes par seconde) avec des feuilles de routes ambitieuses à la fois aux USA, au Japon et en Chine qui visent une échéance vers 2020, dans les faits reportée à une date postérieure. Ce passage du PétaFlops à l'ExaFlops se fera au prix d'évolutions architecturales majeures : exploitation d'un parallélisme massif avec des architectures à très grand nombre de cœurs (pour l'ExaFlops plusieurs millions de cœurs sont à envisager), utilisation d'accélérateurs du type GPGPU ou Xeon Phi et donc la nécessité d'exploiter au mieux des architectures distribuées à grande échelle et souvent hétérogènes car composées à la fois de processeurs multi-cœurs et d'accélérateurs.

La quête de l'ExaFlops suscite de multiples défis technologiques si l'on veut disposer d'un supercalculateur atteignant 1 ExaFlops avec une consommation raisonnable de l'ordre de 20 MW. L'enjeu énergétique de même que les problèmes de résilience, avec des probabilités de panne bien plus fréquentes que sur les configurations actuelles, sont donc devenus critiques. La conception de calculateurs offrant une puissance de l'ordre de 50 Gflops par Watt (en cumulant la puissance consommée par le calculateur et le refroidissement) pour atteindre cet objectif énergétique, est encore hors de portée des technologies actuelles. En effet, dans le classement des supercalculateurs les plus efficaces énergétiquement, la machine la plus performante en juin 2015 (Shoubu à RIKEN au Japon) réalise 7 MégaFlops par Watt sur le benchmark LINPACK (cf. green500.org). Il y a également une énorme différence entre la performance des calculs et la rapidité d'accès aux données sur les calculateurs actuels. Améliorer les technologies d'interconnexion et de conception des mémoires pour augmenter les débits et diminuer les latences est donc primordial.

A ces défis matériels s'ajoutent, en plus des enjeux liés à l'énergie et la résilience, de multiples défis tant au niveau du support d'exécution que du logiciel : l'étude de nouveaux modèles de programmation pour les machines exascales ; le développement des environnements et des supports d'exécution, méthodes et algorithmes adaptés au parallélisme massif et à l'hétérogénéité des architectures (grand nombre de cœurs et donc de threads, présence d'accélérateurs, utilisation d'un parallélisme hybride OpenMPI / MPI, ...) ; les environnements matériels et logiciels permettant une gestion des données pour répondre aux besoins du "Big Data" (volume, vitesse, variété et véracité des données) ; les environnements de développement performants (outils de programmation, debuggers, analyse de performance pour les architectures hétérogènes à large échelle, ...) ; assurer la reproductibilité et l'exactitude des calculs sur les systèmes exascales avec des pannes fréquentes et la difficulté à reproduire les communications collectives lors de deux exécutions différentes.

PERSPECTIVES POUR LE HPC

Ces évolutions requièrent donc des efforts dans plusieurs domaines dont entre autres : la conception / l'exploitation efficace des futures architectures (hardware, système, support d'exécution, résilience) avec la généralisation du parallélisme et de l'hétérogénéité ; l'impact des technologies du type GPU et autres accélérateurs (Xeon Phi,...) ; la maîtrise du passage à l'échelle ; la modélisation / les méthodes numériques / les algorithmiques avec la conception de codes et de bibliothèques de calcul adaptées ; le traitement des grandes masses d'informations.

Le domaine du calcul intensif est très bien structuré au niveau européen avec le programme PRACE (Partnership for advanced computing in Europe) lancé en 2008 suite à DEISA (Distributed European Infrastructure for Supercomputing Applications) qui a donné naissance à une infrastructure européenne et nationale structurée en Tiers :

- Tier-0 : Centres européens avec 6 calculateurs dans 4 pays (Allemagne, France avec la machine Curie au TGCC (Très Grand Centre de calcul) / CEA, Espagne, Italie) d'une puissance totale de 15 pétaFlops avec 2 pétaFlops en France.
- Tier-1 : 3 centres nationaux (CINES : Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur, IDRIS au CNRS, TGCC/CEA) d'une puissance totale dépassant 5 Pflops en 2015.
- Tier-2 : centres de calcul régionaux.
- GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif) est en charge des investissements dans les centres nationaux en plus de la représentation de la France au sein de PRACE.

Le calcul haute performance est aussi adopté dans les grands groupes industriels pour qui la simulation numérique (TOTAL, EDF, Airbus, ...) est une préoccupation centrale et il existe des efforts spécifiques vers l'adoption de cette technologie par les PME-PMI avec des programmes tels HPC@PME (<http://www.initiative-hpc-pme.org/>) ou encore le plan Supercalculateurs.

Dans ce contexte, l'ANR a initié plusieurs programmes entre 2008 et 2011, et plusieurs appels à projets ont été lancés avec pour ce qui concerne le Calcul Haute Performance le projet "PetaFlow" qui aborde les problèmes de visualisation des grands volumes de données issus entre autres des simulations numériques à grande échelle.





INFRASTRUCTURES POUR LE CLOUD

Depuis une quinzaine d'années, les infrastructures distribuées à grande échelle, dont les grilles informatiques et maintenant le "Cloud", font l'objet d'une attention considérable aussi bien en Europe qu'aux États-Unis et au Japon. Après dix années d'exploitation des grilles de calcul, force est de constater que bien que ces modèles aient été un succès considérable pour le traitement des données du LHC (Large Hadron Collider), ainsi que pour quelques autres projets très structurés, leur mise en œuvre reste complexe et leur utilisation nécessite une expertise que beaucoup de communautés ne possèdent pas. L'émergence des Clouds basés sur des techniques de virtualisation permet d'envisager de créer des infrastructures informatiques beaucoup plus souples et accessibles à l'ensemble des communautés scientifiques. Pour cette raison, les techniques de virtualisation sont peu à peu intégrées aux grilles existantes (par exemple WLCG : Worldwide LHC Computing Grid et EGI : European Grid Infrastructure) pour assister, à terme, à une convergence des modèles. Les clouds peuvent être privés (par exemple à une entreprise) ce qui est de plus en plus fréquent, liés à une communauté par exemple scientifique ou publics de dimension nationale ou internationale.



CLOUD : HISTORIQUE DES TECHNIQUES

Le concept de Cloud Computing (l'informatique en nuage) a évolué en plusieurs étapes en partant de grilles de calcul pour arriver au mode d'exploitation actuel du Cloud. Il s'agit d'exploiter des ressources à distance (accessibles via internet), allouées à la demande en fonction d'un certain nombre de critères. Les caractéristiques essentielles du cloud sont : la réservation de ressources à la demande, un paiement à l'usage et l'élasticité des ressources (adaptation des ressources aux variations de la demande).

Le Cloud s'appuie sur une mutualisation des ressources et des techniques de virtualisation (on constate également l'adoption récente de solutions à base de "containers" avec par exemple la technologie "Docker"), une architecture orientée services et les services web. Trois niveaux croissants de services sont accessibles en mode cloud, soit en partant du plus bas :

- Infrastructure en tant que service (IaaS : Infrastructure as a Service) qui permet un accès à un ensemble de ressources informatiques virtualisées sur lequel l'utilisateur peut déployer des machines virtuelles (système d'exploitation et applications) correspondant à ses besoins.
- Plateforme en tant que service (PaaS : Platform as a Service) où le fournisseur offre un système d'exploitation plus des outils pour gérer l'infrastructure, le client déployant ses applications et éventuellement ses propres outils.
- Logiciel en tant que service (SaaS : Software as a Service) où les applications sont gérées par le fournisseur et accédées par les clients par exemple via un navigateur.

ENJEUX SCIENTIFIQUES ET RECHERCHE AUTOUR DU CLOUD

De multiples enjeux scientifiques sous-tendent ces évolutions et cette généralisation du Cloud et se retrouvent au cœur des divers appels lancés par l'ANR entre 2008 et 2011 (soit les programmes : ARPEGE entre 2008 et 2010 autour des systèmes embarqués et des grandes infrastructures, INFRA en 2011 sur les infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique, INS en 2011 sur l'ingénierie numérique et la sécurité, VERSO entre 2008 et 2010 sur les réseaux du futurs et les services) avec des recherches liées :

- L'environnement pour les infrastructures à grande échelle (supports, réseaux, communications, énergie, hétérogénéité, intergiciel, systèmes et objets distribués, infrastructures logicielles réparties, sécurité dans les grands systèmes, virtualisation, reconfiguration, etc.). Ainsi, le projet "SPADES" étudie une solution extensible d'accès à l'agrégation de ressources de calcul pour les architectures petascale qu'il faudra apprendre à maîtriser efficacement et fait donc un lien avec le calcul haute performance.
- Le passage à l'échelle.
- La gestion des ressources (résilience, virtualisation, administration autonome, adaptation dynamique...).
- La gestion des services (calcul orienté service, gestion, workflows...) avec par exemple le projet "SOP" qui vise à construire un modèle de fonctionnement hybride efficace pour l'informatique des particuliers comme du monde professionnel.
- La gestion et le stockage des données dans les systèmes distribués à grande échelle étudié dans le projet "ConcoRDanT" sur la cohérence des données sans contrôle de concurrence, pour le nuage et le pair-à-pair alors que le projet "MAPREDUCE" aborde le traitement intensif de données sur des infrastructures cloud et hybrides.
- Les applications réparties (nouveaux concepts, support de langages et outils, etc.).
- L'algorithmique et ordonnancement, etc.

CHIFFRES CLÉS DE L'ACTION DE L'ANR (2008-2011)

DOMAINE DU HPC ET DU CLOUD COMPUTING

4

PROGRAMMES SCIENTIFIQUES

13

PROJETS FINANCÉS

EN MOYENNE :

4,6

PARTENAIRES
PAR PROJET

712 K€

D'AIDE ALLOUÉE

AU TOTAL :

- UN SOUTIEN FINANCIER APPORTÉ À PLUS DE :

21

LABORATOIRES
PUBLICS

28

PARTENAIRES
DE CATÉGORIE
"DIVERS PUBLIC"

11

ENTREPRISES

■ 3 PME

■ 5 TPE

■ 3 ENTREPRISES AUTRES QUE TPE ET PME

- LA PRODUCTION DE :

54

PUBLICATIONS DANS
DES REVUES AVEC
COMITÉ DE LECTURE

17

PROJETS SUJTE

162

COMMUNICATIONS
DANS DES
CONFÉRENCES
INTERNATIONALES

Le domaine des grilles et du cloud a connu durant la dernière décennie une évolution et une structuration très semblables à celle du calcul haute performance. Après les projets DataGrid du 6^e programme cadre de recherche et de développement européen (PCRD) entre 2001 et 2004, et les trois projets EGEE (Enabling Grids for E-sciencE) : EGEE (2004-2006), EGEE-2 (2006-2008) et EGEE-3 (2008-2010), et de façon identique à PRACE, AISBL, l'organisation pérenne d'EGI.eu (European Grid Initiative) a vu le jour début 2010 comme résultat de l'activité du projet EGI-DS (European Grid Initiative Design) entre 2007 et 2009, afin de piloter toutes les initiatives de ce secteur. EGI regroupe aujourd'hui trente-trois pays et son siège est basé à Amsterdam. L'Institut des Grilles et du Cloud du CNRS, créé en 2007 pour coordonner l'ensemble des travaux de l'organisme dans le domaine des grilles de production et des grilles de recherche, coordonne également l'ensemble des efforts français dans EGI via France Grilles, notamment dans le projet européen EGI-Inspire. Le Groupement d'Intérêt Scientifique France Grilles est chargé d'assurer le déploiement et le fonctionnement des grilles informatiques françaises. Celles-ci rassemblent plus de 25000 processeurs distribués dans une vingtaine de sites sur le territoire français.

Dans les années 2000, la capacité à déployer des applications accessibles via le Web, la généralisation de l'accès internet grand-public (avec 75 % des ménages équipés de l'Internet à domicile selon le Crédoc en 2011), l'augmentation de la puissance des infrastructures informatiques permettant de proposer des tarifs toujours plus compétitifs en plus de la souplesse qu'il offre dans la gestion des infrastructures et des services expliquent le succès du Cloud aujourd'hui. On peut considérer que les précurseurs dans le cloud sont des entreprises comme Amazon et Google ensuite suivies par des éditeurs logiciel majeurs (tels Oracle, Microsoft,...) et des hébergeurs qui ont déployé des offres de cloud allant de l'échelle d'une communauté locale ou nationale à une dimension mondiale.

Les principaux acteurs français se retrouvent bien entendu parmi les opérateurs de téléphone (Orange, SFR) mais aussi les fournisseurs d'hébergement comme OVH. Une fédération de Cloud académique se déploie actuellement à l'instigation de France Grilles. On notera le soutien dans le cadre des investissements d'avenir de deux consortiums, CloudWatt et Numergy pour développer un cloud souverain avec des données hébergées en France. En termes d'évolution des infrastructures, en plus de développer une infrastructure de clouds académiques adossée aux clouds publics qui pourra dans un certain nombre de cas se substituer progressivement et de façon transparente à la grille avec une qualité de service stable, la sécurité des services informatiques demeure un souci permanent et une priorité. On assiste aussi à une convergence au niveau européen avec une plus grande concertation et des initiatives communes entre les diverses infrastructures de grille / cloud, HPC et données i.e. à EGI, PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe), EUDAT (European Association of Databases for Education and Training), EU-T0 Data Research and Innovation Hub, etc. qui devrait s'intensifier.

Les verrous majeurs sont liés aux évolutions actuelles avec des architectures massivement parallèles et hétérogènes, les préoccupations énergétiques, l'avènement du cloud et le "déluge" de données que l'on constate.

Le principal élément structurant de la recherche sur les grilles en France est la plateforme nationale GRID'5000 pour la recherche autour des grilles et cloud avec une forte composante autour des données. Cette plateforme a été un précurseur au niveau international qui a inspiré d'autres projets en particulier aux USA. Elle fédère une bonne partie des recherches de la communauté informatique en France autour du Cloud.

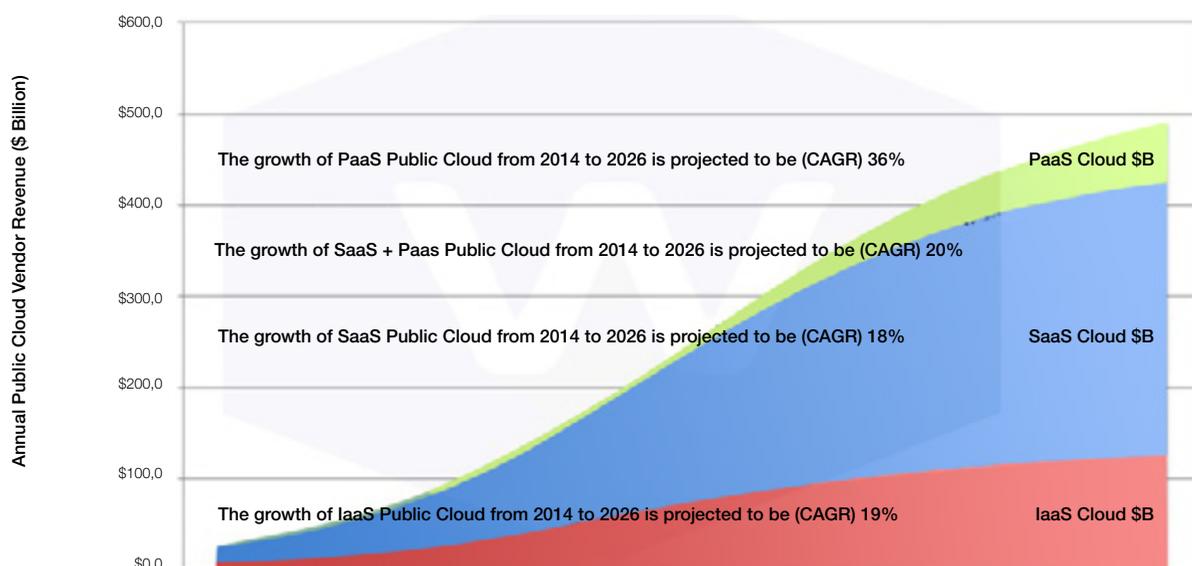
Michel DAYDÉ

Remerciements à Alfredo Buttari (CNRS-IRIT), Daniel Hagimont (INPT-IRIT), Frédéric Desprez (Inria Rhône-Alpes)



Public Cloud Vendor Revenue Projection 2012 - 2026 (\$Billion)

Revenus annuels des fournisseurs de Cloud public, prévisions de 2012 à 2026 (en milliards \$)



	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
■ PaaS Cloud \$B	\$0,7	\$1,1	\$1,7	\$2,3	\$2,8	\$3,6	\$5,6	\$9,1	\$14,4	\$21,8	\$31,0	\$41,2	\$51,4	\$60,7	\$68,3
■ SaaS Cloud \$B	\$19,6	\$27,6	\$39,4	\$52,5	\$77,4	\$102,4	\$132,5	\$165,4	\$197,7	\$226,6	\$250,2	\$268,1	\$281,3	\$290,9	\$298,4
■ IaaS Cloud \$B	\$6,1	\$9,9	\$15,1	\$24,9	\$35,3	\$48,0	\$60,7	\$73,7	\$86,1	\$97,0	\$106,1	\$113,2	\$118,7	\$122,8	\$126,2
Total Cloud \$B	\$26	\$39	\$56	\$80	\$116	\$154	\$199	\$248	\$298	\$345	\$387	\$422	\$451	\$474	\$493

Source : © Wikibon 2015

- The growth of PaaS Public Cloud from 2014 to 2026 is projected to be (CAGR) 36% : La croissance du cloud PaaS public de 2014 à 2026 est estimée à 36%
- The growth of SaaS + Paas Public Cloud from 2014 to 2026 is projected to be (CAGR) 20% : La croissance du cloud SaaS +PaaS public de 2014 à 2026 est estimée à 20%
- The growth of SaaS Public Cloud from 2014 to 2026 is projected to be (CAGR) 18% : La croissance du cloud SaaS public de 2014 à 2026 est estimée à 18%
- The growth of IaaS Public Cloud from 2014 to 2026 is projected to be (CAGR) 19% : La croissance du cloud IaaS public de 2014 à 2026 est estimée à 19%
- PaaS : platform as a service (Plate-forme en tant que service)
- SaaS : software as a service (logiciel en tant que service)
- IaaS : infrastructure as a service (infrastructure en tant que service)

INFRASTRUCTURES DE SERVICES

UN MONDE D'OBJETS NUMÉRIQUES CONNECTÉS

À la fin des années 2000, la convergence numérique annoncée depuis longtemps est devenue une réalité à travers la généralisation de la voix sur IP dans les réseaux de télécommunication, le succès du Triple Play sur les accès Internet et la numérisation totale des contenus audiovisuels (TNT, cinéma numérique). En parallèle, les usages numériques ont diffusé largement au sein de la société et des acteurs économiques, selon des modalités capitalisant sur la connectivité offerte par l'Internet et sur les services web utilisés pour une large gamme d'applications. L'évolution des infrastructures matérielles a accompagné cette numérisation aussi bien pour les capacités des processeurs que pour les capacités de stockage, sans oublier la poursuite de la miniaturisation et de l'intégration. Celle-ci a déclenché l'utilisation massive des "smartphones" qui va marquer le début de la décennie suivante et installer les prémices d'un monde d'objets numériques connectés.

INFRASTRUCTURES MATÉRIELLES ET LOGICIELLES : S'ADAPTER AUX INNOVATIONS NUMÉRIQUES INCESSANTES

Les possibilités pour la création de nouveaux services semblent illimitées et de nombreux acteurs petits ou grands en profitent pour tester de nombreuses innovations qui parfois rencontrent un marché ou un besoin, contribuant à l'émergence de belles réussites commerciales, notamment celles bénéficiant des effets de leviers des réseaux sociaux. L'innovation est aussi présente en matière de modèles d'affaires qui dépassent la traditionnelle édition de solutions logicielles, la vente d'équipements complets ou les services avec abonnement pour autoriser des modèles basés sur la coopération et l'audience ou encore l'utilisation d'initiatives en logiciel libre. Cette effervescence transcende les cloisonnements traditionnels des marchés, gommant progressivement les frontières entre usages personnels et usages professionnels ou entre les secteurs économiques, permettant à certains acteurs des équipements et des services de conquérir avec une apparente facilité "numérique" des marchés adjacents à leur métier d'origine.

Outre les progrès des infrastructures matérielles qui non seulement améliorent constamment le ratio performance/coût ou la miniaturisation mais entraînent également une banalisation des équipements, visible notamment alors dans le domaine de l'informatique (et qui arrivera quelques années plus tard dans le domaine des télécoms), les infrastructures logicielles évoluent très rapidement par vagues d'innovations successives (voire d'effets de mode) même si cohabitent avec succès dans les systèmes des technologies d'ancienneté, maturité et diffusion très diverses.

Dans ce contexte, le panorama des acteurs évolue, lui aussi, au rythme des innovations techniques. La tendance à la "commoditisation" des matériels et des réseaux a entraîné des consolidations industrielles majeures (notamment parmi les fournisseurs d'équipements informatiques et télécoms, au détriment des acteurs européens et même américains). Des écosystèmes complets sont maintenant en compétition, orchestrés par des acteurs utilisant une stratégie de plateforme permettant à des tiers d'offrir plus facilement des services à valeur ajoutés. L'Amérique du Nord reste ainsi en position dominante pour les offres non liées aux réseaux (OTT - Over the top), bénéficiant d'une dynamique d'innovation continue, d'un marché local de taille critique et de services directement déclinables au niveau mondial, en court-circuitant notamment les démarches de standardisation et en bousculant parfois les législations. Même si elle héberge quelques belles réussites en matière d'acteurs logiciels, de télécoms et de services, l'Europe peine à retrouver une stratégie "offensive" pour contrer les acteurs des réseaux sociaux, du cloud ou du traitement des données notamment les GAFA (Google/Apple/Facebook/Amazon) et la myriade des startups technologiques qui les accompagnent et les complètent.



SERVICES NUMÉRIQUES : APPORT DES PROJETS ANR

Le formidable dynamisme dans le domaine des NTIC fait parfois oublier un état de l'art qui oscille entre des processus très industriels pour certains composants ou services critiques et le génie individuel de quelques créateurs / artisans en passant par des équipes de développement qui ont parfois du mal à contrôler la complexité, les performances ou la qualité de leurs propres artefacts. En parallèle des pratiques et de l'innovation des acteurs économiques pilotés par leurs marchés, les efforts coordonnés de recherche, tant fondamentale qu'appliquée, doivent donc se poursuivre, à la hauteur des enjeux sociétaux qu'entraîne la numérisation annoncée de tous les secteurs (économie, citoyenneté, éducation, vie pratique, culture).

Les actions mises en place par l'ANR sur la période 2008-2011 ont permis de répondre à certains de ces enjeux, au travers des différents appels à projets et instruments de financement couvrant un large spectre. Les actions en matière d'infrastructures de services sont bien sûr complémentaires de celles sur les infrastructures de réseaux qui apportent la connectivité nécessaire aux usages ubiquitaires et à la mise en œuvre de systèmes distribués à grande échelle et encore plus de celles touchant aux infrastructures logicielles pour l'informatique en nuage qui accompagnent une rupture dans la façon de déployer et administrer les services. Les projets financés par l'ANR se sont intéressés à des thématiques majeures pour le développement et les usages des services numériques et les cinq paragraphes suivants en présentent un panorama non exhaustif, en lien avec les infrastructures de services.



Conception, fonctionnement et administration de systèmes complexes

Capitalisant sur les architectures logicielles à base de services distribués (par exemple SOA Service Oriented Architecture), les projets ont étudié les problématiques système notamment celles liées au passage à l'échelle et aux cycles de vie dynamiques, en introduisant des fonctionnements autonomiques (SALTY, CONTINUUM), en permettant l'adaptation au contexte (CONTINUUM), en optimisant la gestion des événements (SOCEDA), en optimisant les architectures jusque sur les processeurs (PARTOUT). Les projets ont aussi pris en compte l'ouverture des systèmes d'information, pour les rendre accessibles à partir de terminaux embarqués (ITEMIS, AMORES), pour les connecter au monde physique via l'Internet des Objets (INCOME, WINGS) ou pour les connecter aux systèmes d'information personnels (PIMI). Ont été étudiés la modélisation des systèmes, la dynamique de leurs comportements, leurs distributions et parallélisme, les intergiciels facilitant leur construction et la composition des services ou la coopération dynamique entre les composants ou agents.

Traitement de l'information, des contenus et de la connaissance

Évoluant à partir d'architectures classiques très focalisées sur les bases de données, les services exploitent maintenant des informations d'origines et de natures très diverses, nécessitant des mécanismes d'accès prenant en compte l'hétérogénéité et la mobilité (OPTIMACS) et des mécanismes de partage non centralisés (Dataring). L'exploitation et l'utilisation des informations et contenus sous-tendent des interactions sociales que l'on peut analyser (Ex-Deuss) ou favoriser (ACE), en utilisant des techniques de modélisation, des algorithmes d'extraction de connaissance et de pilotage des comportements (systèmes à agents). La production et la consommation des contenus multimédias entraînent des contraintes spécifiques pour offrir des services performants en limite des capacités des infrastructures de réseaux, leur distribution et leurs échanges ayant fait l'objet de travaux tenant compte de la dynamique de répartition des utilisateurs (VIPEER, CROWD). Il est à noter que la vague de big data s'est appuyée sur des recherches antérieures à celle de la période concernée qui a surtout été celle du développement et de déploiement de solutions opérationnelles dans ce domaine.

Caractéristiques non fonctionnelles des services

Une architecture de services a pour objectif principal de supporter les fonctions à valeur ajoutée attendue par ses utilisateurs, en matière d'accès à l'information, de communication, d'exécution de transactions ou d'interactions avec le monde physique. Un grand nombre d'acteurs devenant dépendant de ces fonctions désormais critiques dans de nombreux secteurs, bien au-delà de l'économie numérique, il devient primordial de garantir la pérennité et la sûreté des infrastructures de services. Dans la période, les projets se sont focalisés sur la problématique de la sécurité, aussi bien dans des contextes applicatifs spécifiques comme l'aérospatiale (SOBAS) que pour la prise en compte dans des mécanismes génériques de composition de services (CESSA). La sécurisation de services nécessite parfois des réglementations spécifiques dont la mise en œuvre doit être étudiée dans le cadre de projets pluri-disciplinaires, intégrant notamment des juristes (DEMOTIS sur des problématiques liées à la santé).



Contraintes spécifiques liées au matériel

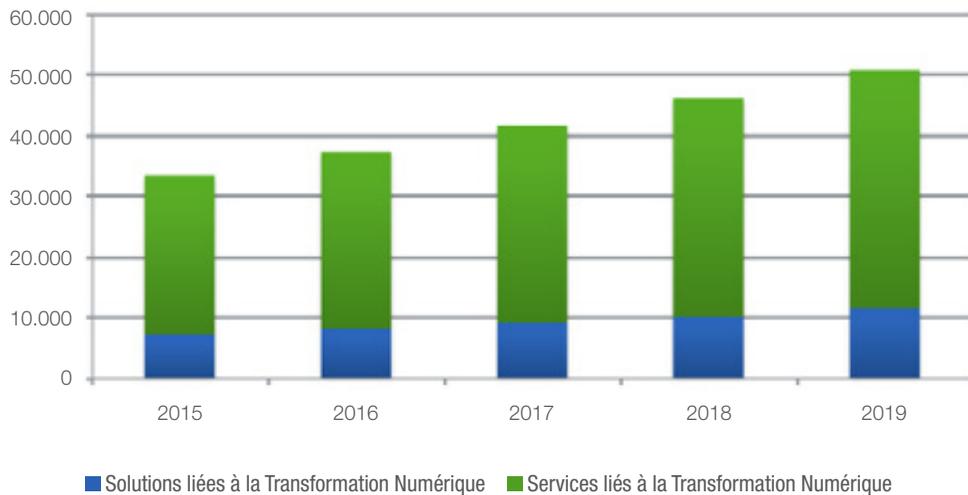
Tous les artefacts numériques nécessitent des ressources matérielles pour s'exécuter ou interagir, des processeurs aux liens de communications, y compris ceux basés sur la radio. Dans le cadre d'une économie durable, les systèmes numériques doivent donc optimiser leur architecture et leur fonctionnement de façon à limiter l'impact sur les ressources naturelles (en matériaux ou en énergie) et à utiliser au mieux les ressources partagées (spectre radio). Les projets se sont ainsi penchés sur la frugalité énergétique des systèmes, en optimisant les data centers (CRTL-GREEN), en optimisant les couches d'exécution de bas niveau (INFRA-JVM), en développant des outils permettant de modéliser et simuler les comportements énergétiques dans la phase de conception (Open-People). Un des axes importants abordés a été l'adaptation statique ou dynamique qui prolonge la durée de vie des systèmes en évitant le renouvellement des matériels ou l'utilisation d'équipements dédiés, pour les circuits intégrés ou les systèmes embarqués (SACSO et FAMOUS). Enfin, les objets les plus simples peuvent offrir des interfaces numériques (RFID par exemple) qu'il faut intégrer pour permettre des interactions naturelles entre les mondes virtuels et matériels (IMAGIT).

Numérisation de la société

Même si la majorité des projets financés déclinaient leurs propositions techniques dans des cadres d'usages permettant d'appréhender l'impact des avancées proposées, pour des domaines très divers (réseaux sociaux, transports, santé, culture...), certains projets se sont spécifiquement consacrés à étudier les opportunités de nouveaux services dans des domaines particuliers ou l'impact de la numérisation dans certains secteurs. Un des domaines phare reste celui des usages au sein des domiciles connectés, par exemple pour améliorer la sécurité et l'inclusion des personnes, notamment les plus fragiles ou les plus isolées (Sweet-Home, Amalys). Un autre domaine

est celui des médias où la numérisation et la connectivité permet de créer de nouvelles expériences de consommation et d'interaction transmédia (AMALYS). Les impacts citoyens peuvent aussi être importants, par exemple en facilitant la collecte et le partage des informations sur un territoire donné, pour en faciliter la gestion et offrir de nouveaux services à la population (MOANO). Dans certains cas, une approche pluridisciplinaire a été adoptée pour identifier des phénomènes émergents, par exemple dans le cadre des réseaux sociaux qui sont devenus des infrastructures de services à part entière (NIS).

Le marché de la Transformation Numérique en Europe - 2015 - 2019 (en million d'Euros)



Source : PAC - Market Figures | Digital Transformation | 2015

RÉPONDRE À L'EXPLOSION DES SERVICES NUMÉRIQUES

Ces programmes de l'ANR ont été exécutés durant une période charnière dans l'histoire dense des NTIC. Dans le même temps, se sont produits :

- la généralisation de l'informatique mobile qui entraîna de nombreuses révolutions d'usage et précéda la vague suivante de miniaturisation portant sur les objets connectés ;
- la généralisation de la connectivité de données quasi permanente qui autorisa le basculement total vers des services en ligne ;
- la diffusion du Cloud Computing facilitant la mise en place de services à grande échelle en limitant les investissements ;
- et la mise en place de grandes bases de données et des traitements associés qui, via le big data, apporteront une meilleure connaissance sur le comportement des infrastructures de services et leurs usages.

Des avancées certaines ont été faites sur la gestion des systèmes complexes, sur leur sécurité ou leur efficacité énergétique, sur l'intégration des objets connectés, sur le traitement et l'exploitation de l'information, sur la connaissance des nouvelles interactions permises aux seins des communautés. Toutes ces thématiques ont été prises en compte dans un contexte d'intense compétition mondiale où programmes de recherche, communautés open source et stratégies d'entreprises gravitent de concert, parfois en conjonction favorable mais aussi parfois en opposition de phase ! La virtualisation et la migration logicielle des réseaux, la numérisation des villes et des réseaux utilitaires, l'informatique enfouie rejoignent maintenant cette constellation d'activités, pour complexifier non seulement les systèmes mais aussi les jeux d'acteurs et les impacts sociétaux. Dans un contexte d'explosion des services numériques et de numérisation des services classiques ("uberisation"), réactivité, rapidité d'exécution, pluridisciplinarité sont plus que jamais nécessaires en complément de l'excellence scientifique ou technique pour transformer les actions coopératives en produits technologiques, en usages innovants et en création de valeur durable et responsable.

Valère ROBIN

CHIFFRES CLÉS DE L'ACTION DE L'ANR (2008-2011)

DOMAINE DES INFRASTRUCTURES DE SERVICES

9

PROGRAMMES DE SOUTIEN
À LA RECHERCHE

28

PROJETS FINANCÉS

EN MOYENNE :

5,5

PARTENAIRES
PAR PROJET

924 K€

D'AIDE ALLOUÉE

AU TOTAL :

- UN SOUTIEN FINANCIER APPORTÉ À PLUS DE :

62

LABORATOIRES
PUBLICS

34

PARTENAIRES
DE CATÉGORIE
"DIVERS PUBLIC"

60

ENTREPRISES

■ 21 PME

■ 19 TPE

■ 20 ENTREPRISES AUTRES QUE TPE ET PME

- LA PRODUCTION DE :

104

PUBLICATIONS
DANS DES REVUES
AVEC COMITÉ
DE LECTURE

337

COMMUNICATIONS
DANS DES
CONFÉRENCES
INTERNATIONALES

49

PROJETS SUITE

7

DÉPÔTS
DE BREVETS

7

BREVETS

3

CRÉATIONS
DE NOUVELLES
ENTREPRISES





COMPOSANTS POUR LES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Les télécommunications concernent les transferts réciproques de données par voies filaire, hertzienne ou optique. Ces transferts de données se font dans le cadre de différents réseaux particuliers ou universels comme le réseau internet ou dans le cadre de réseaux mobiles qui peuvent être ou non connectés à internet. Quant aux objets de toute nature, ils deviennent des objets communicants capables de communiquer entre eux grâce à la mise en place d'un internet des objets, lui-même éventuellement connecté au réseau internet. Les réseaux fixes ou mobiles (2G, 3G, 4G, Wimax, WiFi, protocoles pour liaisons entre objets, 5G en 2020) peuvent donner lieu à des liaisons hertziennes terrestres, à des liaisons par fibres optiques ou à des liaisons hertziennes par satellites. Les satellites peuvent assurer eux-mêmes la diffusion de liaisons avec les mobiles, réaliser des liaisons fixes avec la terre, établir des liaisons entre satellites ou être le relai de liaisons avec d'autres satellites en espace profond. Pour les liaisons hertziennes, les fréquences vont d'une centaine de MHz jusqu'au THz. Pour les liaisons optiques, les longueurs d'onde sont autour de 0,85 ou 1,3 ou 1,5 μm .

Le traitement des ondes hertziennes passe par la conception de nombreux circuits électroniques qui s'appuient sur des composants électroniques adaptés aux très hautes fréquences. Les segments optiques des liaisons font appels à des circuits et des composants photoniques. Mais lorsque les fréquences deviennent très élevées ou quand apparaissent des contraintes telles que de très grandes largeurs de bandes, les circuits électroniques ne peuvent plus répondre à la demande. À titre d'exemple, un signal à 300 GHz ne peut pas être obtenu directement par un circuit oscillateur électronique. Il faut passer par une multiplication de fréquence ou, mieux encore, par le battement de deux lasers dans une photodiode. Et les lasers et la photodiode sont des composants photoniques. C'est ainsi que se répandent de plus en plus des techniques de circuits photoniques microondes.

Pour réaliser des systèmes de communications comportant des circuits électroniques ou des circuits photoniques ou des circuits photoniques microondes, il faut disposer de technologies adaptées. Et pour cela, plusieurs étapes doivent être franchies.

Une première étape concerne la recherche de nouveaux composants. Cela va des différents transistors GaN (Nitrure de Gallium) aux amplificateurs optiques en passant par les lasers à structures quantiques. Pour cela, les équipes de recherche doivent avoir accès à une technologie souple capable de réaliser des structures nouvelles pour faire des démonstrations de concepts.

Une deuxième étape consiste à développer une technologie stabilisée qui est utilisée par un concepteur de circuits à travers des règles de conception et des règles de dessin. Mais un équipementier en télécommunication qui ne s'est pas assuré d'avoir accès à une telle technologie et à ses évolutions qui ont lieu en permanence, a évidemment un handicap considérable par rapport à un équipementier qui développe sa propre technologie.

Une troisième étape, consiste donc à mettre en place des technologies fonctionnant en mode fonderie, c'est-à-dire utilisables à partir d'une plateforme comportant des outils de simulation, de règles de conception ou de dessin et des solutions de packaging accessibles de l'extérieur.





PRENDRE EN COMPTE LES CIRCUITS DE FAIBLE ET DE FORTE PUISSANCE

En ce qui concerne les circuits électroniques, ils se divisent en circuits faible puissance et circuits forte puissance qui vont de la centaine de mW à des centaines de W. Les circuits de faible puissance en haute fréquence sont réalisés en technologies de circuits intégrés monolithiques microondes (MMIC). Ces technologies font appel à des composants passifs (inductances, capacités, résistances, lignes) et à des composants actifs tels que diodes et transistors microondes. Ces circuits peuvent être réalisés en technologies GaAs ou InP (transistors HEMT et P-HEMT). Mais au fur et à mesure que la taille des grilles des transistors CMOS diminue et donc que ces transistors montent en fréquence, les circuits microondes peuvent aussi être réalisés en technologie CMOS sur silicium ou silicium sur isolant (SOI) pourvu que des composants passifs y soient ajoutés. Ces MMIC sont accessibles dans des fonderies telles que UMS, OMMIC ou ST Microelectronics en Europe. Les transistors de puissance en microondes sont passés des transistors LDMOS aux transistors P-HEMT et maintenant aux HEMT GaN. En effet, le matériau GaN est un semi-conducteur à grand gap. Il supporte donc des tensions très élevées et est adapté à la puissance. Les couches GaN sont obtenues par épitaxie sur des substrats SiC ou Si. En fait, la longueur de maille du semi-conducteur GaN n'est pas la même que celle de SiC ou Si, donc la mise au point de l'épitaxie avec une couche buffer a demandé des développements importants. Mais les applications d'électronique de puissance en basse fréquence (automobile, ferroviaire, aéronautique) ainsi que les LED bleues ou ultra violettes ont constitué une motivation décisive pour développer les techniques adaptées. Plusieurs fournisseurs proposent des composants GaN microondes. Aux USA, les sociétés évoluent, fusionnent ou créent des filiales. Actuellement, les fonderies GaN sont : Wolfspeed (filiale de Cree), MACOM (qui a acheté Nitronex), Tri Quint (qui a acheté RF Micro Device). Au Japon les transistors GaN sont produits par Fujitsu. En Europe, l'ESA et divers MoD (Ministry of Defence) ont appuyé le développement d'une solution GaN sur SiC dans la société UMS. OMMIC a développé sa propre filière GaN sur Si. Le GaN sur SiC a de meilleures performances thermiques grâce à une meilleure conductivité thermique de SiC mais le GaN sur Si permet une production sur des plaquettes de 200 mm de diamètre, donc en plus grande quantité. UMS et OMMIC sont actuellement les fonderies européennes de GaN.

CIRCUITS PHOTONIQUES : DE NOUVEAUX COMPOSANTS

En ce qui concerne les composants ou circuits intégrés photoniques (PIC), certains comme les modulateurs Mach Zehnder, sont très connus. D'autres comme les lasers DFB, les modulateurs à électro absorption, les amplificateurs optiques à semi-conducteurs, ou les diodes UTC et leurs assemblages monolithiques sont bien stabilisés. Mais de nouveaux composants photoniques restent à explorer comme les lasers à boîte quantique ou les très prometteurs lasers bimodes générant deux signaux optiques avec un seul composant, ou encore les lasers à diffusion Brillouin stimulée amenant une diminution radicale de la largeur de raie. Le développement de ces nouveaux composants doit évidemment encore passer par des recherches.

Après les technologies de circuits intégrés microondes (MMIC), il apparaît maintenant le besoin de technologies de circuits intégrés photoniques. Un premier exemple de ce développement est donné par la société INFINERA aux USA (Californie). Cette société a développé une plateforme de conception de

Photonic Integrated Circuits connectée à une technologie de circuits intégrés sur silicium. Mais cette plateforme est strictement réservée à l'activité de l'équipementier de télécommunications INFINERA.

Une autre plateforme PIC existe en Californie, c'est Luxtera. Cette société s'est associée en 2012 avec STMicroelectronics pour réaliser des composants photoniques sur Si. Mais les options de PIC sont assez limitées et restent aux mains d'une société assez éloignée et unique, ce qui ne va pas sans problème. Aux USA, Intel fait aussi des circuits III-V sur Si mais n'est pas plus facile d'accès.

En Europe, la mise en place de plateformes de circuits intégrés photoniques a été soutenue par plusieurs contrats européens et en particulier le contrat en cours PLAT4M du programme Européen FP 7. Les partenaires de ce contrat ont annoncé fin novembre 2015 la mise en place de trois plateformes technologiques de réalisation de circuits intégrés photoniques (PIC) sur Si regroupées dans un environnement de conception unique. Deux plateformes permettent la recherche et le développement de PIC avec des technologies SOI (Silicon on Insulator)

de 200 mm. Elles sont mises en place par l'IMEC (Belgique) et le LETI (France). Par ailleurs, une plateforme technologique basée sur des plaquettes de 300 mm est développée par STMicroelectronics. Elle permettra, dans le même environnement de conception, de passer des prototypes élaborés sur l'une des plateformes IMEC ou LETI à une production à plus grande échelle. Le substrat Si permet de réaliser des circuits logiques, des circuits microondes et certains composants photoniques (guide d'onde) mais d'autres composants pourraient être réalisés en technologie III-V et ajoutés sur le Si par flip chip, bonding et éventuellement ré-épitaxie. Ces plateformes doivent encore être développées au niveau de leur technologie avec les autres partenaires du projet tels que III-V lab. D'autres partenaires doivent aussi développer et mettre en œuvre des logiciels pour la CAO à partir de (modèles de composants, règles de conception et de dessin). S'ajouteront aussi des possibilités de packaging. Ces plateformes devraient ouvrir la voie à une grande variété de solutions innovantes pour les systèmes de télécommunication. Suite à des contrats européens, des PIC peuvent aussi être



réalisés directement sur InP. L'écosystème JePPIX regroupe plusieurs fonderies européennes selon le même principe que ce qui est décrit ci-dessus et qui peuvent être choisies en fonction des applications : Oclaro Technology Ltd. (UK), Fraunhofer Institute HHI (D), SMART Photonics (NL), LioniX (NL).

ANR EN CHIFFRES (2008 - 2001)

DOMAINE DES COMPOSANTS POUR LES COMMUNICATIONS

Entre 2008 et 2011, l'ANR a financé plus de 66 projets qui ont apporté une contribution importante dans les domaines de recherche et développement de nouveaux composants pour les infrastructures de communication qui peuvent être déclinés à partir des tendances générales qui viennent d'être décrites :

- Technologie GaN : GENGIS KhAn, ReAGaN, Satellite
- Nouveaux matériaux et nouveaux composants électroniques ou photoniques : ABSYS2, DIQDOT, LowIQ, TELDOT, ULTRAWIDE, CERISE, GoSPEL, SiPowLight, ELECMADE, INSPIRE, SAGE III-V, SPINNOVA, MARS, ABSYS, MASSTOR, NASTAROD, SEDIMOS, MIGRAQUEL, Nanograin, EMYR, Robust
- Circuits photoniques avec éventuellement intégration photonique sur Si : FAON, JASMIN, MODULE, HENIAC, SILVER, MICROS, ULTIMATE, COHEDIO, INSCOOP, SO FAST, PROWOC
- Nouvelles structures d'antennes : AMORCE, SOCRATE, TRIMARAN, METAPHORT, METAVEST
- Fibres optiques, composants fibrés, réseaux fibrés : STRADE, LIOM, SOLICRISTAL
- Nouveaux circuits ou nouvelles architectures électroniques : EXPRESSO, THID, RUBY, CONNEQT, ARCH2NEU, ARDMAHN, Robust FPGA, CORRIDOR, IMAGE-NET, ASTECAS, COMMAS, SATURN, SecReSoC, HERODOTOS
- Approches quantiques : COCQ, PARADHOQS, HIPERCOM, QINVC, Qscale, SSQN

15 

PROGRAMMES DE SOUTIEN À LA RECHERCHE

66

PROJETS FINANCÉS

EN MOYENNE :

4,2

PARTENAIRES PAR PROJET



739 K€

D'AIDE ALLOUÉE

AU TOTAL :

- UN SOUTIEN FINANCIER APPORTÉ À PLUS DE :

- LA PRODUCTION DE :

111

LABORATOIRES PUBLICS

83

PARTENAIRES DE CATÉGORIE "DIVERS PUBLIC"

466

PUBLICATIONS DANS DES REVUES AVEC COMITÉ DE LECTURE

822

COMMUNICATIONS DANS DES CONFÉRENCES INTERNATIONALES

83

ENTREPRISES

■ 20 PME

■ 16 TPE

■ 47 ENTREPRISES AUTRES QUE TPE

ET PME

49

PROJETS SUITE

32

BREVETS

4

CRÉATIONS DE NOUVELLES ENTREPRISES

12

DÉPÔTS DE BREVETS

QUELLES PROSPECTIVES POUR LES COMPOSANTS ?

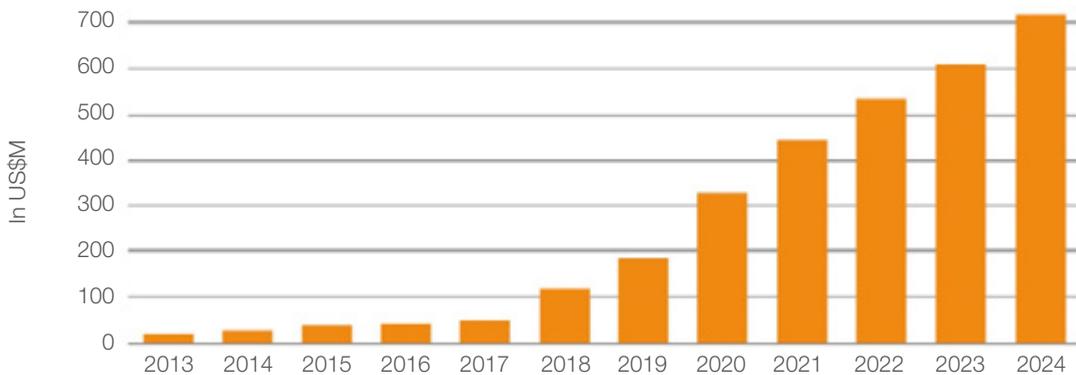
Dans les années à venir, le domaine des télécommunications va continuer à évoluer. Des investissements considérables sont effectués aux USA, en Europe, au Japon, en Corée du Sud et en Chine et des centaines de chercheurs travaillent pour développer la 5G. Les prérequis de cette future génération débouchent sur de nombreuses études et recherches. Certains de ces prérequis donneront lieu à de nouvelles demandes sur les composants. Il s'agit par exemple, de l'augmentation du débit (1 à 10 Gb/s), de l'augmentation en fréquence (jusqu'à 60 GHz) et de la bande passante, de l'augmentation de l'efficacité spectrale, de la densification des stations de base, de la diminution drastique de la consommation électrique et du coût des dispositifs, de l'augmentation de la sûreté de fonctionnement, ou encore de la multiplication des antennes à l'émission et à la réception (massive MIMO). Le développement de l'internet des objets (100 000 objets/km²) demandera l'extension des protocoles existants à la 5G ou le développement de nouveaux protocoles ("massive machine type telecommunications"), mais demandera là aussi une diminution considérable des coûts et des consommations électriques.

Ces évolutions auront également des répercussions sur les réseaux qui regroupent les flux de plusieurs stations de base. Là, les débits envisagés sont de 100 Gb/s et la partie hertzienne des réseaux (terrestre ou par satellite) devra très fortement monter en fréquence (voir les fenêtres non atténuées entre 100 GHz et 3 THz). Ce qui aura à nouveau des conséquences sur les composants (génération, modulation, guidage, amplification, démodulation des signaux). Comme cela a été rappelé au début, cette montée en fréquence s'accompagnera aussi de l'introduction de nombreux circuits intégrés photoniques microondes donnant lieu à de nouvelles recherches et à l'utilisation des plates-formes de conception de circuits intégrés photoniques qui sont maintenant accessibles en Europe.

Enfin, les évolutions énumérées ci-dessus ne sont que des hypothèses : certaines pourraient ne pas se produire dans la direction prévue (internet des objets) et certains dispositifs peuvent émerger soudainement, comme ce fut le cas pour les smartphones. Ceux-ci étaient étudiés dès la fin des années 1990, mais leur utilisation a brusquement explosé en 2007 (écran tactile et nombreuses applications logicielles), en bousculant les fournisseurs d'appareils mobiles et les équipementiers de télécommunication qui ont dû adapter les réseaux. Une tâche des chercheurs est d'anticiper autant que possible en imaginant des dispositifs entièrement nouveaux tels que les lasers à diffusion Brillouin stimulée et en tout cas se tenir prêts à accompagner d'éventuelles évolutions rapides.

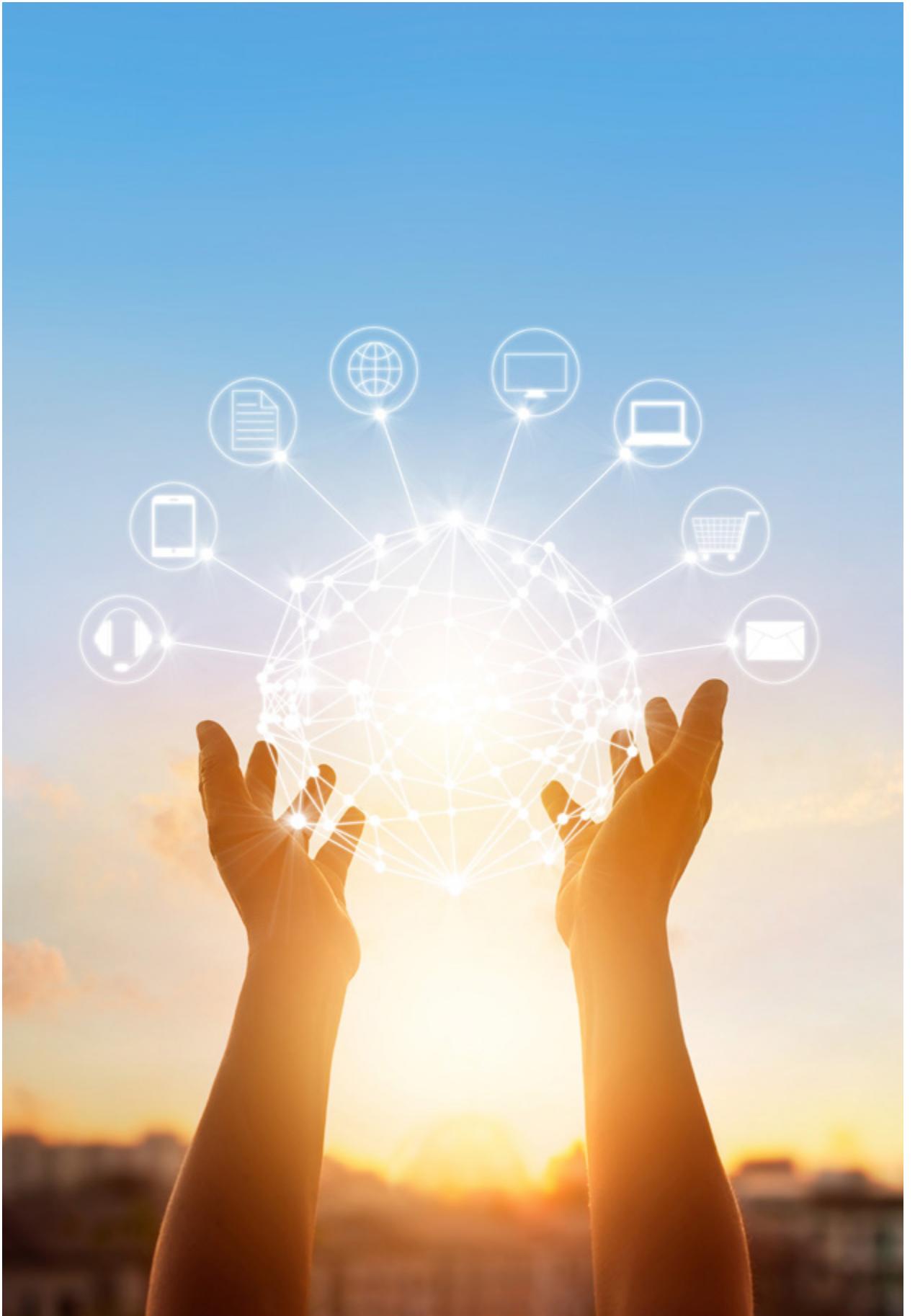
Christian RUMELHARD

Si photonics market forecast



YOLE
Développement

Source : Silicon Photonics 2014 report, Yole Développement, June 2014



02 RETOUR D'EXPÉRIENCE

RÉALISÉ AUPRÈS DES PROJETS¹ PRÉSENTÉS DANS CE CAHIER



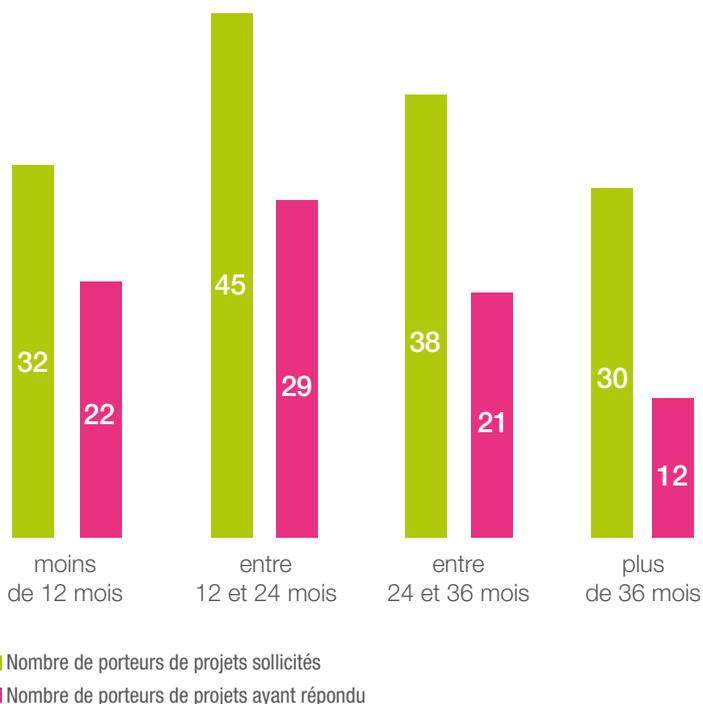
À travers l'ensemble des appels à projets ouverts par l'ANR, le développement du secteur stratégique des infrastructures a pu être soutenu à plusieurs niveaux en finançant aussi bien la recherche fondamentale, industrielle que le développement expérimental.

Pour réaliser ce cahier, nous avons sollicité 145 porteurs de projets financés par l'ANR, afin de dresser pour chaque projet une carte d'identité (objectifs, résultats, équipes mobilisées). Les fiches des projets ayant répondu à cette sollicitation, sont disponibles sur la webkey jointe à ce document. En parallèle, nous leur avons proposé de répondre à un ensemble de questions (Cf. questionnaire en annexe) destinées à identifier, le niveau de maturité technologique TRL (technology readiness level) atteint à l'issue du projet, et les facteurs qui ont le plus contribué à la réussite des projets ainsi que les obstacles qui en ont freinés l'avancement.

TOUR D'HORIZON DES RÉPONDANTS

Ces projets financés entre 2008 et 2011, ont duré en moyenne 42 mois.

Nombre de mois écoulés entre la fin des projets et la sollicitation des porteurs des projets (septembre 2015).

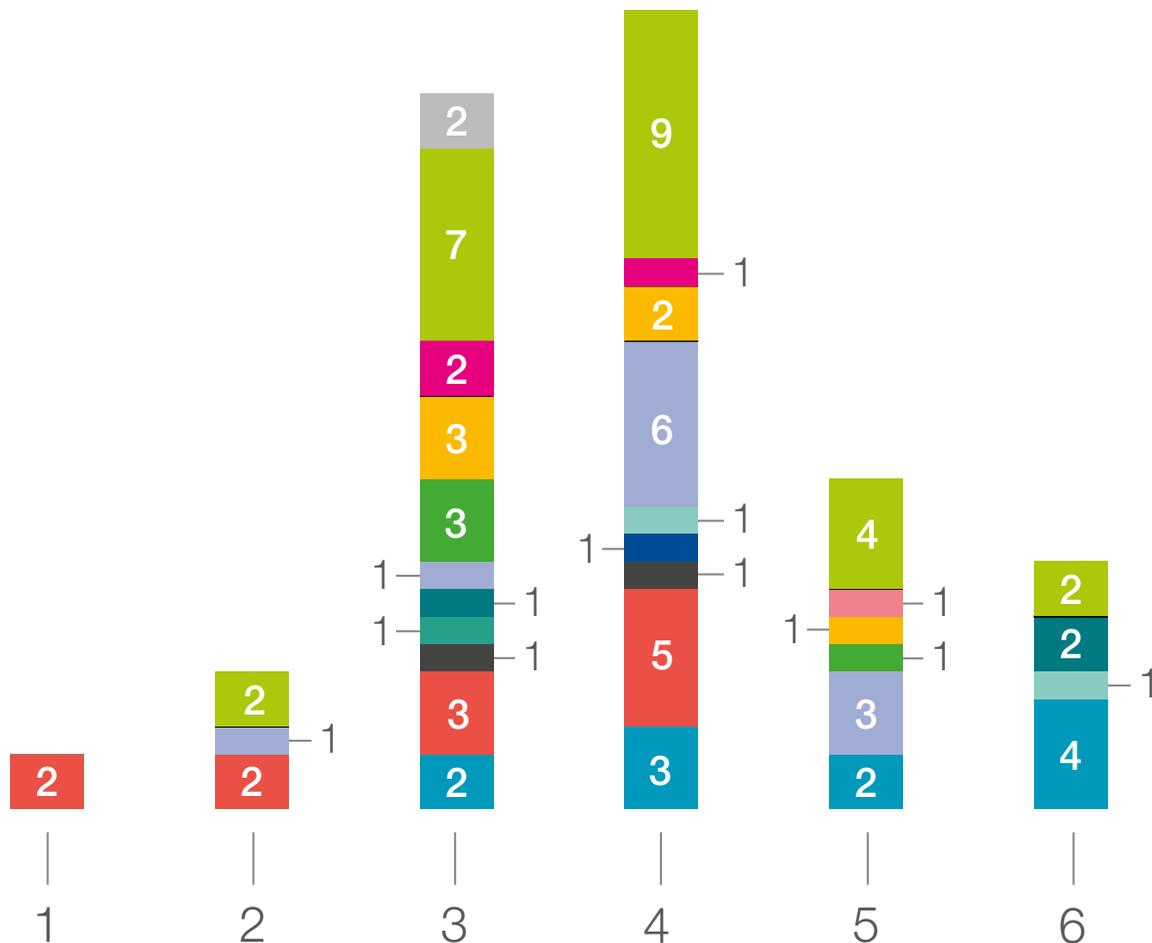


¹ Projets dont les porteurs ont répondu à cette étude

Niveau de maturité des technologies ou concepts développés à l'issue du projet

(Graphe basé sur les réponses indiquées par 83 porteurs de projets)

Niveau TRL (Technology readiness level, ou niveau de maturité technologique) par programme



- ARPEGE (Systèmes Embarqués et Grandes Infrastructures) 11
- BLANC 12
- Blanc international 2010 2
- CHIST-ERA (Era-net) 1
- CONTINT (Contenus Numériques et Interactions) 2
- DEFIS (Domaines émergents) 1
- Émergence (Émergence de produits, technologies ou services à fort potentiel de valorisation) 3
- INFRA (Infrastructures matérielles et logicielles pour la société numérique) 11
- INS (Ingénierie Numérique & Sécurité) 4
- JCJC (Jeunes Chercheurs / Jeunes Chercheuses) 6
- JST (Bilatéral Franco-japonais "Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication") 1
- P2N (Nanotechnologies et Nanosystèmes) 3
- VERSO (Réseaux du Futur et Services) 24
- VTT (Véhicules pour les Transports Terrestres) 2

ANALYSE SWOT (STRENGTHS - WEAKNESSES - OPPORTUNITIES - THREATS) OU MOFF (MENACES - OPPORTUNITÉS - FORCES - FAIBLESSES)

Dans le cadre de cette étude, les coordinateurs ont été invités à s'exprimer sur les facteurs internes et externes qui ont conditionné le déroulement de leurs projets, selon le modèle SWOT (Strengths - Weaknesses - Opportunities - Threats). Cette analyse a été réalisée grâce au questionnaire conçu dans le cadre de ce cahier. Cette section expose la synthèse des analyses SWOT. **Elle est déclinée, en quatre parties, en fonction du type d'instrument de financement ayant soutenu les projets :**

- Projets de recherche collaboratifs - PRC (réunissant uniquement des équipes académiques) ;
- Projets de recherche collaborative - Entreprise PRCE (projets incluant un ou plusieurs partenaires du monde industriel) ;
- Projets JCJC (Jeunes Chercheuses /Jeunes Chercheurs) ;
- Projets de recherche collaborative-International (projets incluant une ou plusieurs équipes de recherche étrangères).

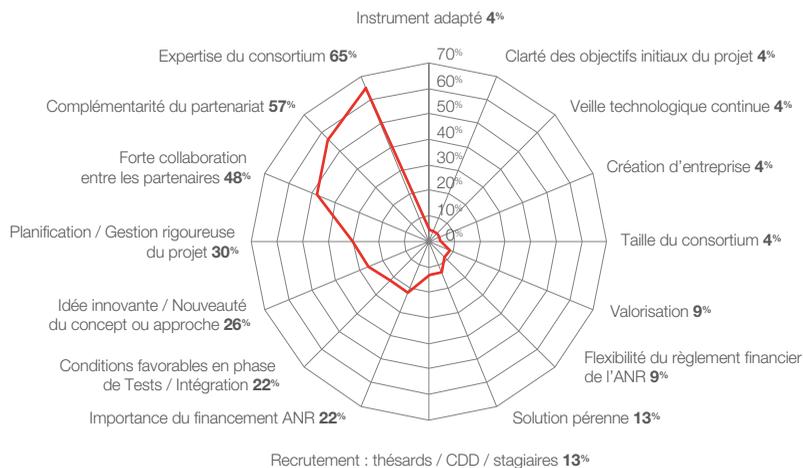


Pour chaque élément du SWOT (forces, faiblesses, opportunités, menaces), nous présentons dans les diagrammes ci-après, les facteurs identifiés en fonction de leur occurrence dans les informations recueillies.



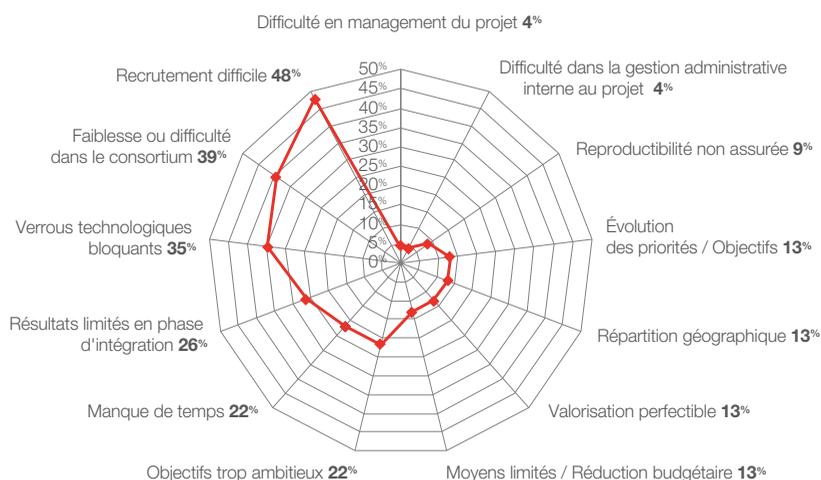
PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIFS (PRC) : 23 PROJETS

Forces (facteurs intrinsèques de réussite) :



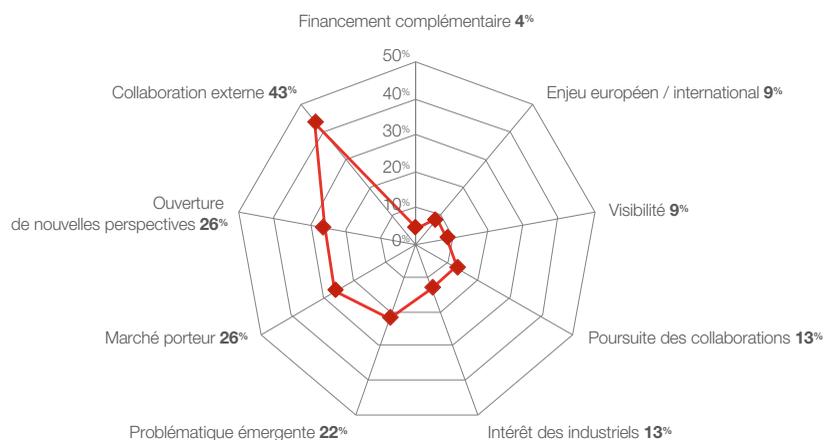
- Les partenaires des projets ont répondu en majorité que la **qualité du consortium** en termes d'**expertise** (65%), de **complémentarité** (57%), et de **collaboration effective** (48%), constitue le levier principal pour la réussite des projets. Ces facteurs positifs mis à profit au cours du projet permettent la mobilisation des compétences et le partage des connaissances pluridisciplinaires, favorisant ainsi l'intelligence collective et un environnement de collaboration privilégié.
- Pour un projet abouti, 30% des porteurs de projets collaboratifs accordent également une grande importance à la **bonne gestion du projet**, aussi bien au niveau de la planification des activités que de la gestion des ressources.
- Par ailleurs, 26% de porteurs de projets pensent que le succès du projet est lié au **caractère innovant des concepts proposés** ou de l'approche proposée pour aborder le sujet traité.
- Pour 22% des porteurs de projets collaboratifs, la validation des résultats en phase de test et/ou intégration constitue un atout pour la réussite finale du projet collaboratif. Le succès de cette étape est notamment associé à la disponibilité et la mobilisation des ressources humaines et matérielles nécessaires.
- 22% de porteurs de projets collaboratifs (PRC) estiment que le financement ANR est déterminant dans le succès du projet.
- Le recrutement du personnel non permanent est indiqué comme élément capital dans la réalisation du projet, par 13% de porteurs de projets collaboratifs (PRC).
- Parmi les autres paramètres contribuant au succès du projet, les porteurs citent la pérennité des solutions proposées face aux évolutions technologiques à 13% ; la flexibilité du règlement financier ANR est mentionnée par 9% de porteurs de projets comme un facteur favorable à la bonne gestion des aléas du projet ; 9% de porteurs de projets associent la réussite du projet à la valorisation des résultats de la recherche.
- Les autres éléments positifs ayant contribué à la réussite des projets PRC sont : la taille restreinte du consortium qui a permis une forte dynamique et une agilité du consortium face aux évolutions scientifiques et technologiques (4%) ; la veille technologique qui a joué un rôle non négligeable pour aborder efficacement la problématique (4%) ; en encore l'adaptation de l'instrument PRC aux sujets de recherche de type exploratoire (4%).

Faiblesses (facteurs intrinsèques freinant la réussite) :



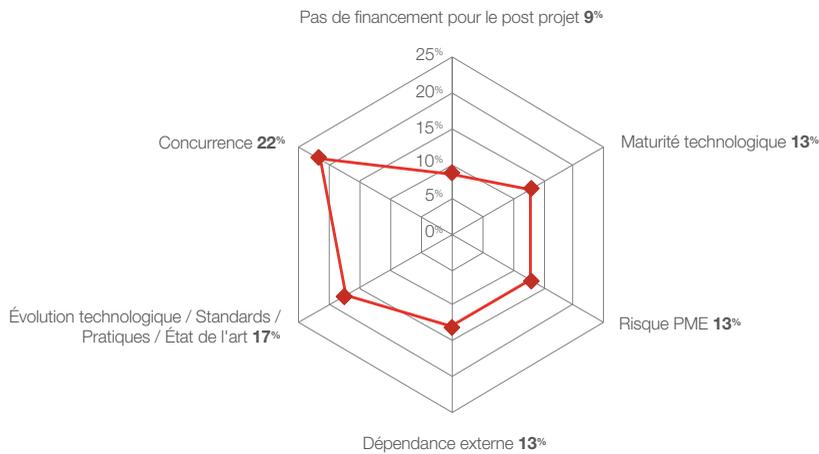
- Une difficulté récurrente partagée par un nombre important de porteurs de projets collaboratifs (48%), est liée aux problèmes de **recrutements du personnel non permanent**. Cette difficulté engendre un retard dans la réalisation de certaines tâches du projet, et pose des problèmes dans la gestion des ressources humaines du projet. Ces recrutements sont parfois déterminants pour l'avancement des travaux, mais ils demeurent néanmoins un aspect difficile à gérer en termes de spécialité et calendrier pour répondre aux besoins du projet.
- Pour 39% des porteurs de projets PRC, la **constitution du consortium**, a manqué de robustesse. Par exemple, la présence d'un partenaire industriel dans le consortium a fait défaut pour 5 projets sur 23 projets collaboratifs. Dans le cas où le consortium est pluridisciplinaire, la collaboration multipartite a été, dans certains cas, freinée par la divergence des visions.
- Le troisième point bloquant (35%) indiqué par les porteurs est en relation avec la **levée de certains verrous scientifiques et technologiques** (certains verrous ne sont levés que partiellement). Les obstacles majeurs évoqués sont le manque de temps ou de ressources, le fait que la technologie ne soit pas suffisamment mature, ou encore la complexité de la problématique qui n'a pas été anticipée.
- 26% des répondants pointent les difficultés rencontrées en phase de prototypage ou d'intégration, et ceci pour différentes raisons : absence d'industriels dans le consortium (4 projets sur 23), technologie nécessaire inaccessible (3 projets sur 23).
- La gestion des aléas subis par le projet a été préjudiciable au bon respect du planning initial, pour 22% des projets.
- Le **caractère trop ambitieux des objectifs initiaux**, est identifié par 22% de porteurs de projets, comme un obstacle à la réalisation des cahiers des charges selon le planning prévu.
- Les autres facteurs qui ont impacté négativement les projets sont : l'insuffisance des moyens financiers (13%) ; la répartition géographique des partenaires n'a pas avantagé l'avancement du projet, selon l'avis de 13% des porteurs de projets PRC ; pour 13% de porteurs de projets, l'écosystème du projet n'a pas été propice à une valorisation optimale des résultats, par manque de ressources ou de soutien industriel ; la réorientation des objectifs au cours du projet face à l'évolution de l'état de l'art ou de la modification des priorités des participants, a constitué une contrainte importante que les projets ont dû surmonter (13%) .
- Enfin, d'autres difficultés sont citées par les porteurs de projets PRC, comme le problème de reproductibilité de la solution (9%), ou encore des difficultés en management du projet (4%).

Opportunités (facteurs externes ayant contribué au bon déroulement du projet) :



- La réalisation du projet a offert l'opportunité de **tisser des liens de collaboration avec des acteurs non partenaires** du projet. 43% de porteurs de projets mettent en avant ces interactions externes qui ont contribué à enrichir l'approche scientifique et les débouchés du projet.
- 26% des porteurs de projets soulignent l'importance du projet à ouvrir des perspectives pour la constitution de **nouveaux partenariats**, et l'exploration de **nouveaux axes de recherche**, prometteurs dans le domaine.
- Une part importante de projets (26%) a bénéficié d'un **marché porteur**, confortant ainsi le choix des problématiques traitées par les partenaires du projet.
- Pour 22% des porteurs de projets collaboratifs, le fait d'avoir adressé une problématique émergente a constitué un facteur de réussite pour le projet.
- L'**intérêt des industriels** a constitué un facteur favorable dans l'avancement des projets, comme évoqué par 13% de porteurs de projets.
- D'autres aspects dont les projets financés ont tiré parti sont : une plus grande visibilité du consortium à travers les échanges avec la communauté scientifique (9%) ; traiter un sujet portant sur un enjeu européen / international a été également un facteur favorable de réussite (9%) ; certains coordinateurs de projets (4%) ont eu l'opportunité d'utiliser des financements complémentaires au profit de leurs projets.

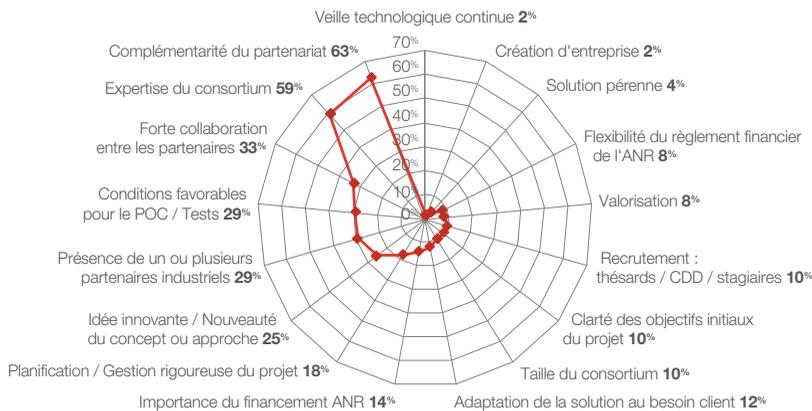
Menaces (facteurs externes ayant freiné le bon déroulement du projet) :



- Le développement de **technologies ou de solutions concurrentes** pendant la vie du projet a limité son impact. Ce facteur à risque a été soulevé par 22% de porteurs de projets collaboratifs.
- L'**évolution de l'état de l'art, des standards ou de la technologie** a été la deuxième incertitude à laquelle se sont confrontés les partenaires des projets (17%). En effet, ce facteur qui n'est pas toujours prévisible à court terme, peut entraîner des résultats obsolètes en fin de projet.
- La **dépendance vis-à-vis d'acteurs ou d'environnements** (prestataires, technologies) **externes** au projet, a mis en difficulté l'avancement de certains projets, comme en témoignent 13% des porteurs. Le partenariat avec une PME est un facteur à risque, puisque son engagement effectif dans le projet est conditionné par l'état de sa santé financière (13%). La levée de certains verrous technologiques et la réalisation de certaines expérimentations dépendent de la maturité et des dernières avancées technologiques, c'est donc un risque mis en avant par 13% de projets collaboratifs. Enfin, 9% des porteurs de projets se préoccupent de la pérennité des moyens pour financer la continuité de leurs travaux post-projet ANR.

PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIVE - ENTREPRISES PRCE : 51 PROJETS

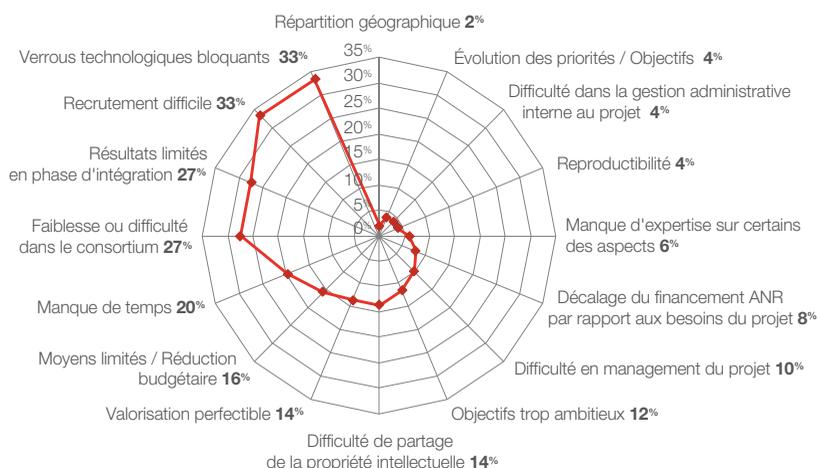
Forces (facteurs intrinsèques de réussite) :



- Les facteurs de réussite ayant été le plus fréquemment cités, dans le cas des projets PRCE, sont relatifs à la **qualité du consortium** : la complémentarité du partenariat (63%), l'expertise du consortium (59%) et la collaboration fructueuse entre les partenaires (33%). La solidité du partenariat permet de mutualiser les ressources et les moyens afin de développer les connaissances nécessaires à l'aboutissement des concepts.
- 29% des porteurs de projets PRCE ont associé le succès du projet au **succès de la phase de validation**, qui a bénéficié d'un écosystème favorable en termes de ressources humaines (savoir-faire académique et industriel, utilisateurs finaux...) et matérielles.
- L'**implication de partenaires industriels** est un atout relevé par 29% des porteurs de projets PRCE. Ce type de partenariat aide souvent le consortium à traiter la problématique dans son ensemble et à exploiter l'expérience des partenaires industriels.
- L'**aspect innovant** du projet est évoqué par 25% des porteurs de projets PRCE, comme étant un facteur de réussite dans le projet.
- D'autres paramètres ont participé aussi au succès des projets financés, comme la **gestion rigoureuse** du projet par le coordinateur (18%), l'aide allouée au projet (14%), l'adaptation de la solution aux besoins des clients (12%), la taille adéquate du consortium (10%), la clarté des objectifs initiaux (10%), le recrutement du personnel non permanent (10%), la valorisation des résultats à travers les publications ou les brevets (8%). Enfin, la souplesse du règlement financier ANR est également un facteur positif pour faire face à certaines difficultés rencontrées par les projets PRCE (8%).

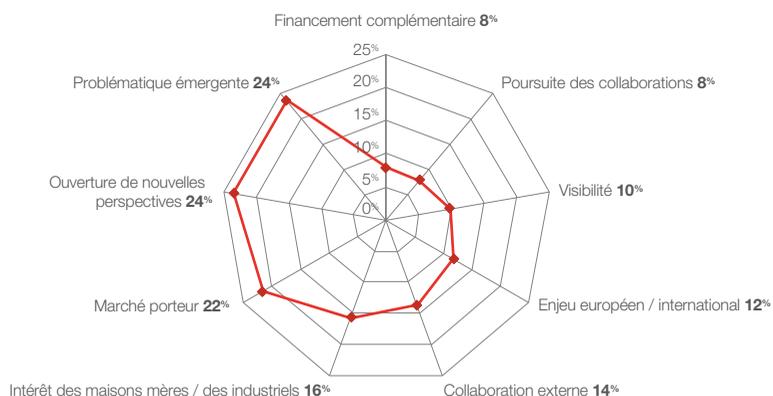


Faiblesses (facteurs intrinsèques freinant la réussite) :



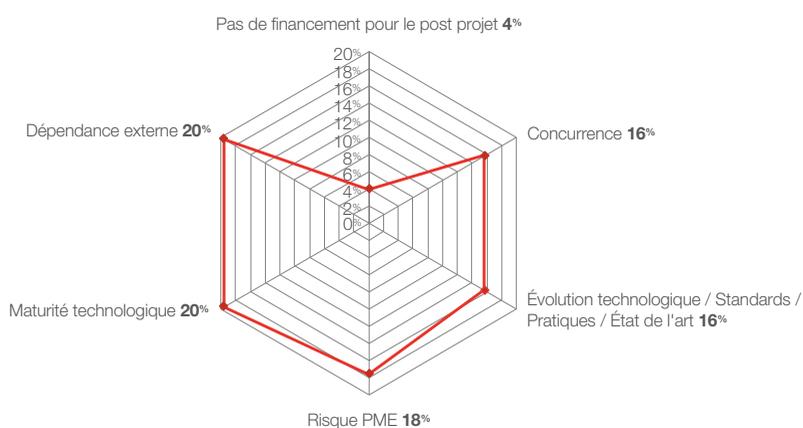
- Les freins évoqués par les acteurs des projets sont en premier lieu d'ordre scientifique et technologique : la **difficulté de lever certains verrous scientifiques ou techniques**, a été soulevée par 33% des porteurs de projets PRCE. En effet, les partenaires des projets évoquent les obstacles suivants : le **manque de temps** pour approfondir les résultats, l'accès à certaines technologies, les incidents techniques, l'aspect exploratoire de la recherche, etc. La problématique de **recrutement** du personnel non permanent est mentionnée par 33% des porteurs de projets PRCE. Cette difficulté est en rapport avec la **spécificité des compétences recherchées** sur une période déterminée, la rupture des contrats, le turnover, et le besoin en ressources humaines pour les projets à fort contenu technologique. Ces contraintes impliquent des retards dans le planning qui peuvent être plus ou moins résorbés.
- Les obstacles rencontrés en phase de validation, ont été relatés par 27% des porteurs de projets PRCE : l'écosystème en termes de partenariat n'a pas toujours été propice pour un projet démonstrateur.
- 27% des porteurs de projets PRCE, estiment que la constitution de leur consortium a présenté certaines faiblesses qui trouvent leurs origines dans : **les politiques différentes des partenaires** (académique vs industriel), les difficultés dans l'élaboration de l'accord de consortium, ou encore dans le nombre trop important des partenaires.
- Par ailleurs, le manque de temps est évoqué comme un paramètre difficile à maîtriser par 20% des porteurs de projets PRCE.
- Certains porteurs de projets (16%) regrettent les contraintes budgétaires, qui ont empêché le déroulement prévu du projet, en mettant en cause, soit la réduction budgétaire demandée au projet avant le démarrage, soit le coût élevé de la technologie en phase d'expérimentation ou intégration, qui n'a pu être financée entièrement par l'aide.
- 14% des porteurs de projets pointent des faiblesses en phase de valorisation, par manque de moyens, de ressources ou encore d'experts en transfert industriel.
- D'autres facteurs ont constitué des freins à l'avancement des projets PRCE : le partage de la propriété intellectuelle (14%) ; les objectifs initiaux trop ambitieux (12%) ; les problèmes de coordination et management de projet (10%) ; le décalage dans la mise en place des crédits alloués par rapport au planning du projet (8%). Pour quelques projets, l'expertise pour lever certains verrous à fait défaut (6%) ; la reproductibilité de la solution n'est pas assurée (4%) ; la gestion administrative en interne a pu être parfois bloquante (4%) ; la réorientation des objectifs face à des difficultés rencontrées ou face à l'évolution de l'état de l'art n'a pas avantagé certains projets (4%) ; la répartition géographique du consortium n'a pas favorisé les échanges (2%).

Opportunités (facteurs externes ayant contribué au bon déroulement du projet) :



- Pour 24% des porteurs de projets PRCE, l'environnement extérieur a été favorable, dès lors que le projet s'est intéressé à une **problématique émergente**. L'avancement du projet a tiré profit de l'engouement pour l'évolution de la technologie et les perspectives d'usage.
- Les réponses indiquent aussi que 24% des participants associent le succès de leurs projets, **aux nouvelles perspectives ouvertes** à l'issue du projet (nouveaux domaines de recherche, nouveaux marchés, nouveaux usages pour les utilisateurs, etc.).
- 22% des porteurs de projets PRCE, ont bénéficié d'un **marché porteur** pour développer des concepts qui répondent à des besoins nouveaux, en phase avec l'intérêt croissant des chercheurs et des industriels au niveau national et international.
- **L'intérêt des maisons mères et plus généralement du monde industriel** aux solutions proposées a renforcé la dynamique du projet (16%).
- 14% des porteurs de projets évoquent l'opportunité de collaborer avec d'autres acteurs extérieurs au projet, ce qui a permis de nourrir les réflexions menées au sein du projet.
- Pour 12% des porteurs de projets, l'environnement externe est avantageux pour le projet lorsque celui-ci est axé sur des **enjeux européens ou internationaux**.
- Les répondants ont cité d'autres opportunités qui ont participé à l'essor de leurs projets : la visibilité des partenaires et des résultats grâce à la participation aux salons, séminaires et autres interactions avec la communauté (10%) ; les perspectives de rencontrer les futurs partenaires et le montage de futurs partenariats (8%) ; les sources de financement complémentaire (8%).

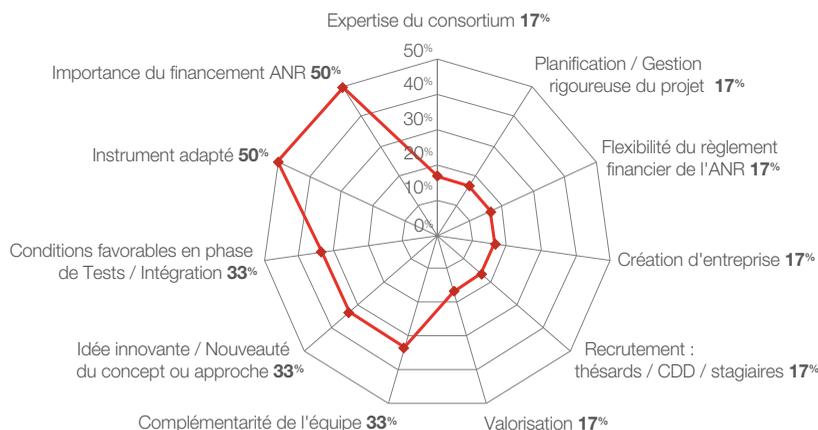
Menaces (facteurs externes ayant freiné le bon déroulement du projet) :



- Le premier risque, relevé par 20% des porteurs de projets, concerne la **gestion des parties prenantes externes**, dont dépend l'avancement du projet (fournisseurs, prestataires, financeurs, etc.). Cette dépendance peut engendrer des difficultés en phase d'expérimentation et des retards par rapport au planning prévisionnel.
- Le deuxième risque abordé par 20% des porteurs de projets est le **manque de maturité de la technologie**, dont certains projets ont besoin pour avancer.
- Les projets peuvent être vulnérables par rapport aux **contraintes multiples des partenaires privés**, notamment les PME (difficulté financière, turnover, orientation stratégique, désengagement, etc.). Ce risque a impacté le déroulement du projet selon l'avis de 18% des porteurs de projets.
- 16% des porteurs de projets citent la **difficulté d'adaptation face à l'évolution technologique**, de l'état de l'art, des standards ou des usages.
- Certains projets (16%) ont souligné les problèmes liés à la concurrence sur des sujets caractérisés parfois par une rivalité scientifique accrue et par un développement rapide.

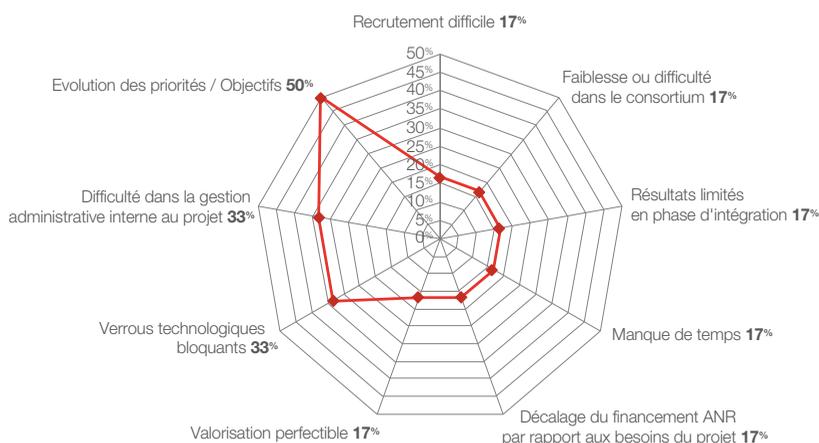
PROJETS JEUNES CHERCHEUSES / JEUNES CHERCHEURS (JCJC) : 6 PROJETS

Forces (facteurs intrinsèques de réussite) :



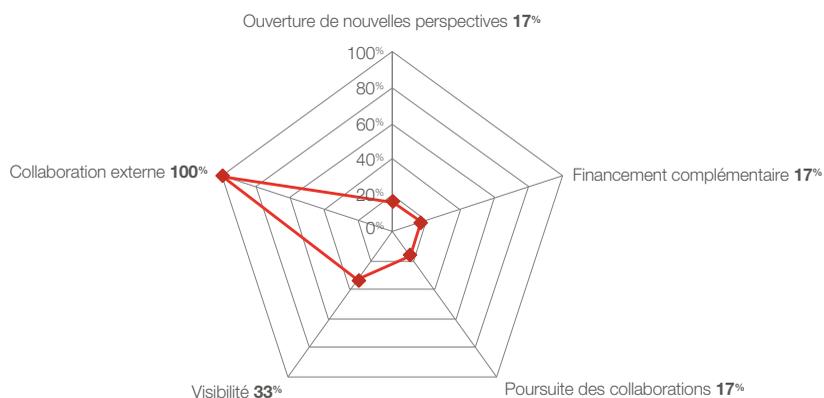
- Le **financement accordé** par l'ANR est un atout majeur pour la réalisation du projet, selon l'avis de 50% des porteurs de projets JCJC. L'aide allouée a permis d'assurer les moyens nécessaires au bon déroulement du projet.
- L'**adéquation de l'instrument de financement** au projet est également un des aspects clés mis en avant par 50% des porteurs de projets JCJC. Ce type d'instrument a favorisé, avec une gestion simplifiée du consortium, l'autonomie des Jeunes chercheurs, le développement de sujets plus amont, et le tremplin vers de nouveaux projets d'envergure.
- Pour 33% des porteurs de projets JCJC, le succès du projet est associé à la réalisation de démonstrateurs, grâce notamment à la collaboration avec des experts externes dans le cadre du projet.
- Parmi les autres critères qui ont fait la force de 17% de projets JCJC, il y a la valorisation scientifique et industrielle des résultats obtenus dans le cadre du projet ; les recrutements qui ont contribué au bon déroulement du projet, ou encore la contribution à des projets de maturation d'entreprise. Pour 1 projet sur 6, les facteurs de succès du projet sont liés à la flexibilité du règlement financier de l'ANR, à la bonne gestion du projet ainsi qu'à l'expertise des membres du projet.

Faiblesses (facteurs intrinsèques freinant la réussite) :



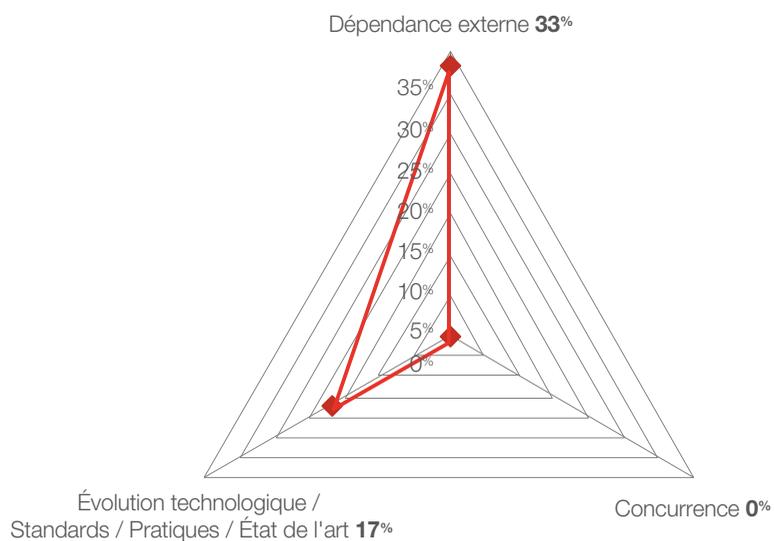
- Parmi les difficultés inhérentes au caractère exploratoire des projets JCJC, 50% des porteurs jeunes chercheurs mettent en avant la **réorientation des objectifs**, pour s'adapter à l'évolution de l'état de l'art.
- Figurent ensuite deux autres critères identifiés par 33% des porteurs de projets JCJC, comme étant des freins au bon fonctionnement de leurs projets. Il s'agit d'une part de **difficultés administratives** rencontrées en interne dans la gestion du projet, et d'autre part de difficultés liées à la complexité de certains verrous scientifico-technologiques.
- Pour 17% des porteurs de projets, l'écosystème du projet n'a pas été favorable à la valorisation et la diffusion des résultats. Pour d'autres porteurs, le démarrage administratif et l'avancement du projet, ont été retardés par les **délais dans la mise en place des crédits**. 17% des porteurs de projets JCJC ont désigné d'autres obstacles à l'avancement de leur projet, comme le manque de temps ou encore les problèmes rencontrés en phase d'intégration. Le bon déroulement d'un projet JCJC peut également être affecté par la taille réduite du consortium, selon l'avis de 17% des porteurs de projets. La difficulté de recruter les bons candidats a été pointée par 17% des porteurs de projets JCJC.

Opportunités (facteurs externes ayant contribué au bon déroulement du projet) :



- Les porteurs de projets JCJC sont unanimes (100%) pour mettre en exergue l'opportunité de **pouvoir étendre les collaborations avec la sphère scientifique** au cours de la réalisation de leurs projets.
- 33% des porteurs de projets JCJC soulignent que le financement du projet a offert une visibilité aux partenaires du projet, grâce aux colloques et différentes interactions avec le monde scientifique dans le cadre du projet.
- Parmi les autres facteurs extérieurs positifs favorables aux projets JCJC, il y a la possibilité d'**initier de nouvelles relations partenariales** (17%) dans la continuité du projet ANR. Certains porteurs ont pu bénéficier de **financements complémentaires** pour mener à bien leurs projets (17%). L'ouverture de nouvelles perspectives telle que l'obtention de projets d'envergure (ERC), constitue également une vraie opportunité d'après 17% des porteurs de projets JCJC.

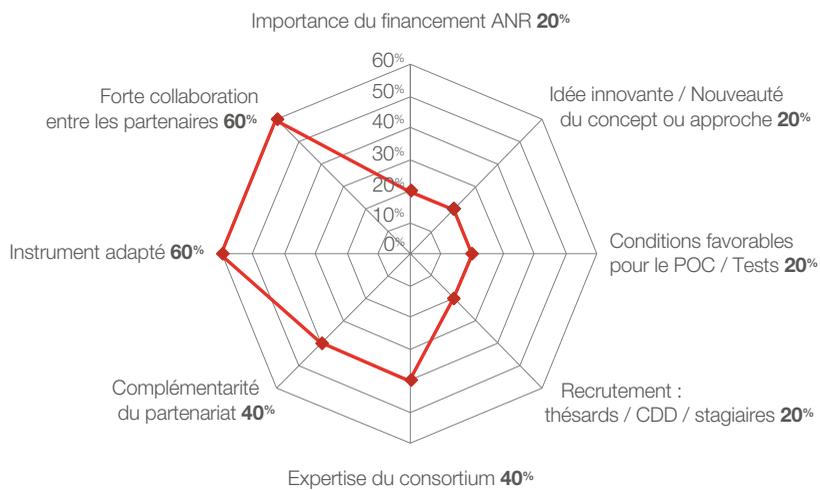
Menaces (facteurs externes ayant freiné le bon déroulement du projet) :



- Le risque principal avancé par 33% des porteurs de projets JCJC, réside dans la **dépendance vis-à-vis de l'environnement extérieur** du projet, comme les contraintes imposées par les fabricants de composants ou encore de la réceptivité du marché ou des utilisateurs.
- À 17%, les porteurs de projets JCJC mentionnent l'évolution technologique ou de l'état de l'art en général comme obstacle qui peut freiner les ambitions du projet.

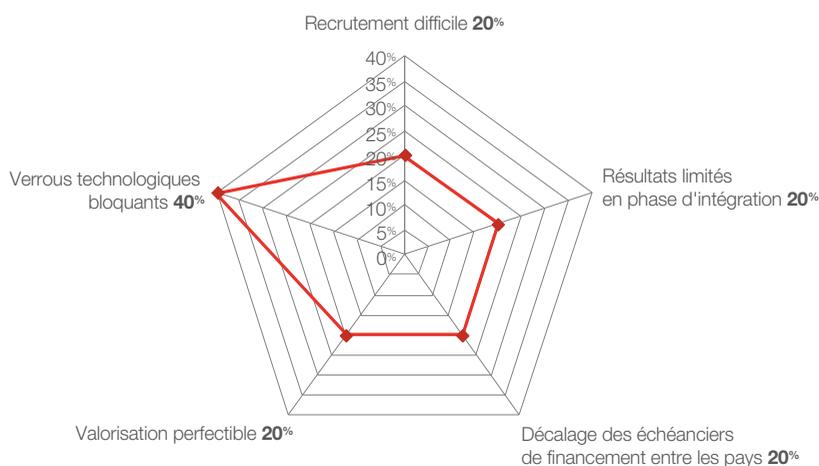
PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIVE - INTERNATIONAL (PRCI) : 5 PROJETS

Forces (facteurs intrinsèques de réussite) :



- Parmi les facteurs ayant contribué à la réussite du projet, 60% des porteurs de projets PCI ont accordé une importance à la **collaboration fructueuse entre les équipes**. 60% des répondants relatent aussi le fait que le type de projet (international) soit adapté à l'objet de la recherche, car le partenariat transnational apporte une valeur ajoutée en termes de coopération et synergie des équipes.
- La **complémentarité et l'expertise des équipes** représentent également deux éléments importants dans le bon fonctionnement des projets PRCI (40%).
- 20% des porteurs de projets PRCI mentionnent d'autres facteurs positifs qui ont contribué au bon fonctionnement du projet : les recrutements de personnel non permanent, et la réalisation de démonstrateurs.

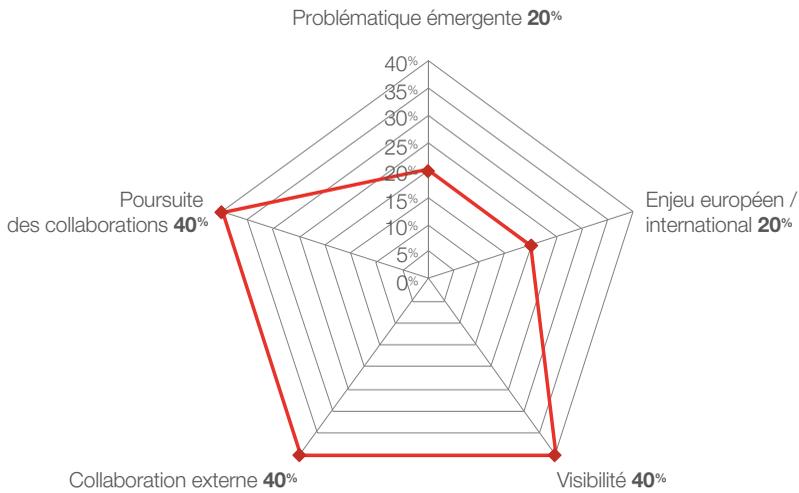
Faiblesses (facteurs intrinsèques freinant la réussite) :



- Les difficultés rencontrées par 40% de projets proviennent de **blocages scientifiques ou techniques** dont la résolution a demandé plus d'efforts que prévu.
- D'autres facteurs d'origine interne ont constitué des points faibles dans la réalisation de 20% de projets PRCI : la valorisation des résultats en terme de co-publications entre les pays n'a pas été privilégiée au cours du projet ; la collaboration a demandé un effort de synchronisation entre les pays pour s'adapter aux différents modes de fonctionnement des agences de financement.



Opportunités (facteurs externes ayant contribué au bon déroulement du projet) :



- Pour 40% des porteurs de projets PRCI, la réalisation des projets ANR a permis le **montage de nouveaux projets**, d'étendre les collaborations et les échanges avec d'autres experts non partenaires des projets, et de **gagner en visibilité**.
- 20% des porteurs de projets indiquent que le projet a disposé d'un contexte favorable, lorsque la thématique abordée porte sur un enjeu européen ou international.

Menaces (facteurs externes ayant freiné le bon déroulement du projet) :

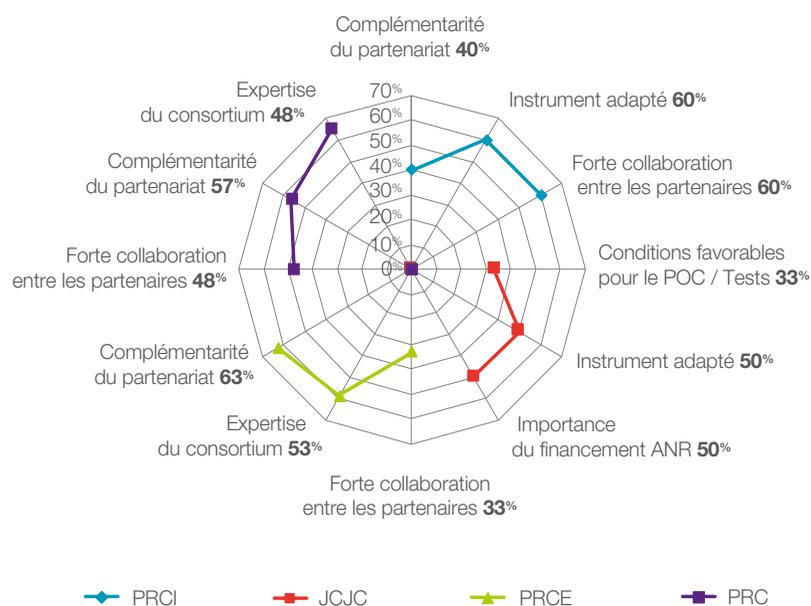
- 20% des porteurs de projets PRCI ont mis en avant les difficultés liées à la dépendance vis-à-vis de l'environnement extérieur au projet.



COMPARAISON DES PRINCIPAUX FACTEURS IDENTIFIÉS PAR LES DIFFÉRENTS TYPES DE PROJETS

Dans la section suivante, est présenté un comparatif des trois principaux facteurs identifiés pour chaque élément du SWOT (Forces, Faiblesses, Opportunités, Risques) :

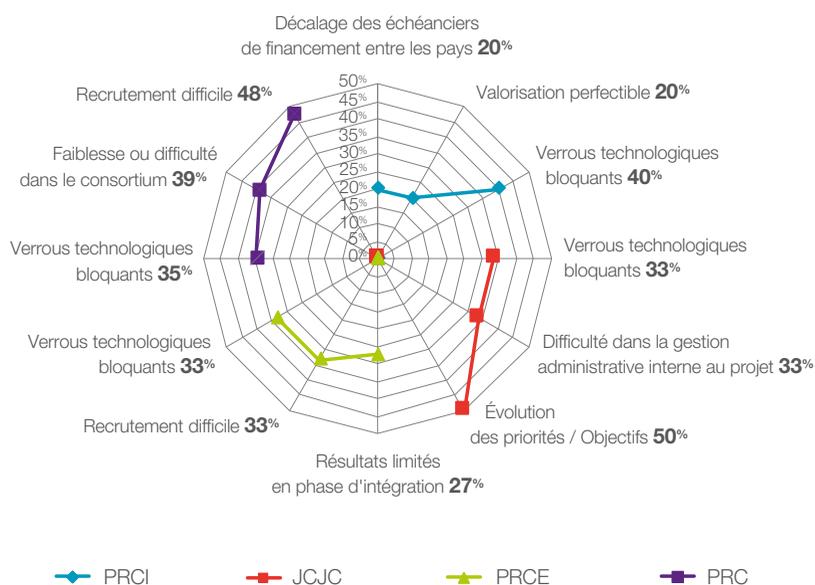
Les trois principaux facteurs internes identifiés comme "forces" :



Concernant les principaux facteurs qui ont contribué au bon déroulement du projet en interne, les porteurs de projets collaboratifs (PRC, PRCE, PRCI) associent majoritairement le succès du projet à la **qualité du consortium** en termes d'**expertise, complémentarité et collaboration**. Tandis que, les porteurs de projets JCJC, et également ceux des PRCI, s'accordent pour mettre en avant l'importance de l'**adéquation de l'instrument de financement aux enjeux du projet**.

De plus, une majorité des porteurs de projets JCJC souligne également le rôle majeur du financement ANR dans la réussite du projet (seule source de financement possible pour ce type d'action en France).

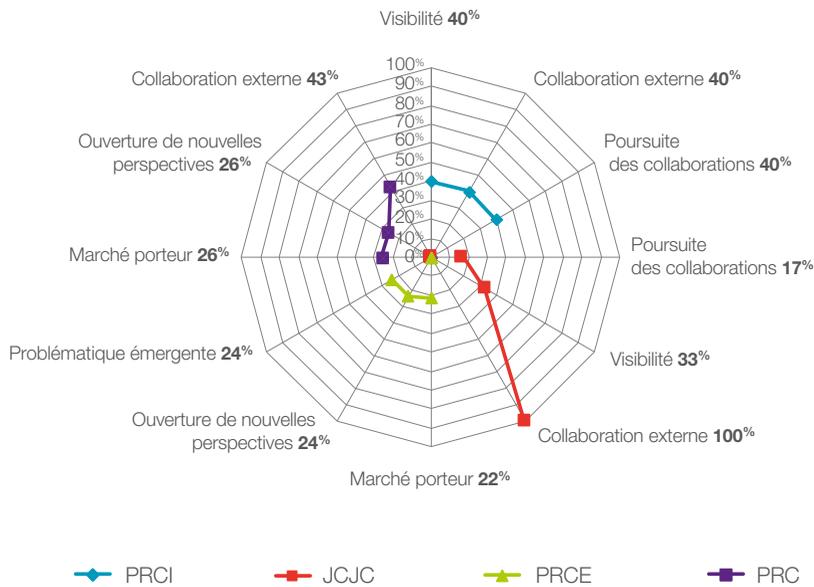
Les trois principaux facteurs internes identifiés comme “faiblesses” :



Le problème de **recrutement** a constitué le principal obstacle identifié par les porteurs de projets PRC et PRCE. De plus, la difficulté de **lever des verrous scientifico-technologiques** est également une constante chez la majorité des porteurs de projets (PRC, PRCI, PRCE et JCJC). Les autres problèmes importants identifiés par les porteurs de projets sont en rapport avec la **constitution initiale du consortium** qui n'a pas été optimale notamment pour le cas de projets PRC, en rapport avec les difficultés en phase d'intégration particulièrement pour les projets PRCE, en rapport avec la gestion des priorités pour les projets JCJC, en rapport avec les difficultés de mise en place de stratégie de valorisation ou de décalage dans les règles administratives des agences de financement des projets PRCI particulièrement.



Les trois principaux facteurs externes identifiés comme “opportunités” :



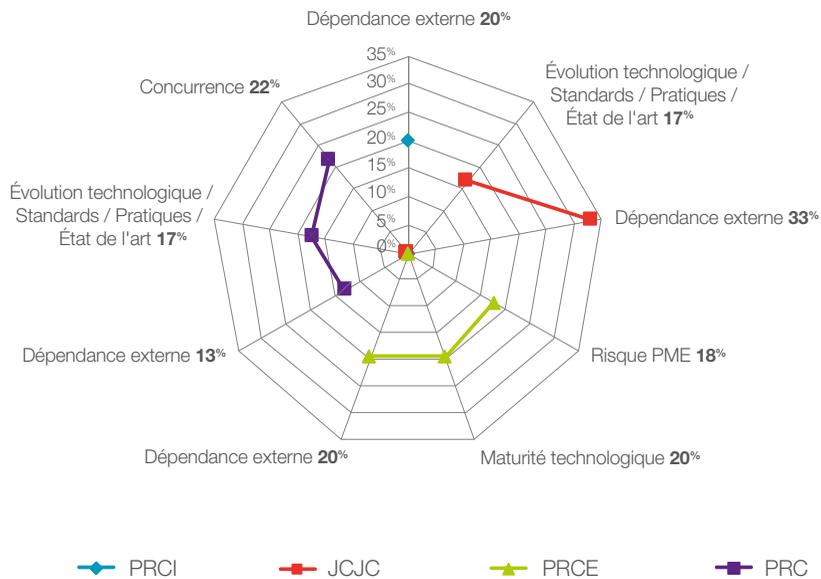
Les principales opportunités communes sont **les possibilités de bénéficier de nouvelles collaborations avec des acteurs non partenaires** du projet, grâce au rayonnement des travaux et résultats des projets notamment dans le cas des projets PRC, PRCE et JCJC. Le **marché porteur** est également considéré par les porteurs de projets PRC et PRCE comme une opportunité importante, dont bénéficie la dynamique du projet.

La réalisation des projets a permis, pour une majorité de partenaires de projets PRC et PRCE, l’ouverture de nouvelles perspectives d’exploration de nouveaux thèmes de recherche, la création de nouveaux marchés, ou encore l’initiation de nouveaux partenariats.

De plus, les porteurs de projets PRCE ont mis en avant l’opportunité d’évoluer dans un contexte favorable lorsque la problématique traitée est émergente. La visibilité dans la communauté scientifique est une opportunité identifiée par les porteurs de projets JCJC et PRCI.



Les trois principaux facteurs externes identifiés comme "risques" :



Le principal risque récurrent relevé par les porteurs de projets (tous instruments confondus), et qui a pesé sur l'avancement des projets est associé aux **contraintes de gestion des parties prenantes externes** au projet (prestataires, fournisseurs, résultats d'autres projets, etc.). De plus, des risques spécifiques sont relevés par type d'instrument, la concurrence qui peut limiter l'impact du projet pour les projets PRC, le risque qui pèse sur les PME impliquées dans les projets PRCE.

La difficulté d'adaptation face aux évolutions scientifiques et technologiques est également citée parmi les trois principaux facteurs à risques par les porteurs de projets PRC et PRCI.

LISTE DES PROJETS

PRÉSENTÉS DANS CE CAHIER



Une recherche exhaustive à partir d'un ensemble de mots clés relatifs à la recherche dans le domaine des infrastructures logicielles et matérielles a été réalisée pour identifier les projets financés par l'ANR dans ce domaine. L'ensemble des porteurs de ces projets a été sollicité par l'ANR pour répondre à un ensemble de questions en lien avec les résultats obtenus à la fin ou quelques années après la fin du projet. 84 porteurs ont répondu à cette sollicitation. La liste de ces projets est présentée ci-dessous. De plus, les fiches détaillées de ces projets sont accessibles via la webkey.



Acronyme et titre	Le pourquoi	Le comment
ABSYS "ADVANCED BST BASED SYSTEM"	Des besoins forts en dispositifs reconfigurables innovants	Une association fructueuse entre chercheurs en matériau et microélectronique
ABSYS2 "ADVANCED BST BASED SYSTEM : NEW RF DESIGN"	Jouer avec le design et les matériaux pour améliorer les téléphones portables	Une synergie entre industriels et chercheurs en matériau et microélectronique
ANALYS "SERVICES MULTIMÉDIAS POUR L'AIDE AU MAINTIEN DU LIEN SOCIAL DES PERSONNES ÂGÉES"	Favoriser les liens sociaux des personnes âgées	Renforcer les liens intergénérationnels grâce à la télévision Amalys
AMORCE "ANTENNE MOBILE ÉMISSION RÉCEPTION COMPACTE POUR LIAISON SATELLITE"	Antenne ultra-plate, balayage mécanique en azimut et électronique en élévation	Démonstration expérimentale de plusieurs preuves de concept
AMORES "ARCHITECTURE POUR LES SYSTÈMES RÉSILIENTS MOBILES ET UBIQUITAIRES"	AMORES favorise des moyens de transports partagés pour réduire l'émission de CO ₂	AMORES : des services géolocalisés respectueux de la vie privée
ARDMAHN "ARCHITECTURE RECONFIGURABLE DYNAMIQUEMENT ET MÉTHODOLOGIE POUR L'AUTOADAPTATION"	Adaptation dynamique des flux multimédias aux besoins de l'utilisateur	Outils et méthodes pour la reconfiguration dynamique de tâches matérielles
ARSSO "ADAPTABLE, ROBUST STREAMING SOLUTIONS"	Améliorer le streaming vidéo sur internet	La combinaison de techniques appliquées aux couches vidéo et transport

Acronyme et titre	Le pourquoi	Le comment
ASTECAS "A SOFTWARE DEFINED RADIO RECEIVER BASED ON A CONFIGURABLE DSP & AN RF SIGMADELTA"	Répondre au besoin de dispositifs portables capables de traiter plusieurs normes	Réaliser un récepteur RF hautement numérisé à partir de convertisseurs SD
CAPTURES "COMPÉTITION ENTRE FOURNISSEURS DE TÉLÉCOMMUNICATION : RIVALITÉS ET ENJEUX"	Étude théorique de la compétition : résultats d'équilibre ? Régulation utile ?	La théorie des jeux permet d'analyser de nombreux scénarii de compétition
CESSA "COMPOSITIONAL EVOLUTION OF SECURE SERVICES USING ASPECTS"	La sécurité d'applications construites par composition de services est cruciale	Techniques pour la définition modulaire de politiques de sécurité
COHEDIO "COLLAGE HÉTÉROÉPITAXIAL POUR L'INTÉGRATION HYBRIDE DE DISPOSITIFS OPTIQUES NANO"	Élaborer des dispositifs photoniques intégrés hybrides sur silicium	Construire le matériau hybride ; nano structurer des Guides optiques
CONCORDANT "LA COHÉRENCE SANS CONTRÔLE DE CONCURRENCE, POUR LE NUAGE ET LE PAIR-À-PAIR"	Système réparti : la cohérence forte ne tolère pas les pannes ; la cohérence faible est complexe	Un CRDT converge par construction et reste toujours disponible
CONNECT "RÉSEAUX ORIENTÉS CONTENU : UNE NOUVELLE EXPÉRIENCE POUR LE TRANSFERT DE CONTENU"	Définir une nouvelle architecture réseau centré sur le contenu	Focus sur trois domaines techniques, évaluation et faisabilité économique des réseaux orientés contenu
CONNEQT "SYNCHRONISATION PAR HORLOGE DISTRIBUÉE APPLIQUÉE À LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE"	Communication quantique haut débit et sur longues distances	Synchronisation tout optique pour implémenter un relais quantique efficace
CONTINUUM "CONTINUITÉ DE SERVICE EN INFORMATIQUE UBIQUITAIRE ET MOBILE"	Les services pour les utilisateurs de terrain doivent s'adapter en permanence	Des modèles et outils logiciels qui permettent aux services de s'adapter en permanence
COOPERCOM "PERCEPTION ET COMMUNICATION COOPÉRATIVE"	Garantir un niveau élevé de sécurité des systèmes embarqués coopératifs	Fusion de données dynamique et coopérative pour l'estimation du risque global
CORMORAN "RÉSEAUX CORPORELS MOBILES COOPÉRATIFS POUR LA NAVIGATION DE GROUPE"	Vers l'internet des sujets : un t-shirt remplace votre GPS et votre télécommande	Une approche pluridisciplinaire au service de preuves de concept expérimentales
CROWD "NOUVEAU MÉDIA PARTICIPATIF POUR LES UTILISATEURS MOBILES"	Système d'échange de données générées par et pour les utilisateurs mobiles	Stratégies d'acheminement de données à partir d'analyses de traces réelles
CTRL-GREEN "ADMINISTRATION AUTONOME DE GREEN DATA CENTERS"	La coordination de boucle de contrôle est un verrou pour l'autonomique computing	Utilisation de techniques formelles de synthèse de contrôleur discret
DATARING "PARTAGE DE DONNÉES EN P2P POUR COMMUNAUTÉS EN LIGNE"	Faciliter le partage des données distribuées pour les communautés en ligne	Développer une approche pair-à-pair qui préserve la confidentialité
DIQDOT "TRANSMETTEUR À FORTE TOLÉRANCE À LA DISPERSION CHROMATIQUE POUR RÉSEAUX D'ACCÈS DE PROCHAINE GÉNÉRATION"	Une nouvelle génération de sources pour les réseaux d'accès	Intégration monolithique d'un laser modulé directement et d'un résonateur

Acronyme et titre	Le pourquoi	Le comment
ÉLAN "RÉSEAUX LOCAUX ÉTENDUS ET INTRANETS D'ENTREPRISES"	Caractériser le trafic du réseau d'entreprise, améliorer sa prise en charge	Mécanismes pour la mobilité et d'ordonnement pour le réseau d'entreprise
ELECMADÉ "NANOCOMPOSANTS MAGNÉTIQUES CONTRÔLÉS PAR UN CHAMP ÉLECTRIQUE"	Contrôler le magnétisme des métaux par un champ électrique	Optimiser des matériaux et techniques de mesures variées
E-QUANET "RÉSEAU EMBRYONNAIRE DE COMMUNICATION QUANTIQUE AUX LONGUEURS D'ONDES TÉLÉCOMS"	Générer, distribuer, manipuler et stocker l'information quantique	Source d'intrication photonique et mémoire quantique cristalline adaptées
EXPRESSO "FILTRES COMPACTS ULTRA-SÉLECTIFS POUR LES PRODUITS SANS FILS DU FUTUR"	Des circuits RF pour les futurs terminaux multimodes et multistandards sans fil	Une nouvelle approche de conception et d'intégration des circuits RF
FAMOUS "FLOT DE MODÉLISATION ET DE CONCEPTION RAPIDE POUR LES SYSTÈMES DYNAMIQUEMENT RECONFIGURABLES"	Proposer un outil de haut niveau pour la conception de systèmes reconfigurables	Proposer une extension du profil MARTE dans une approche basée sur l'IDM
FAON "RÉSEAU D'ACCÈS OPTIQUE PASSIF BASÉ SUR LE PARTAGE DE FRÉQUENCE"	FAON : vers un réseau d'accès optique qui s'adapte aux besoins des utilisateurs	Le partage en fréquence et l'intégration photonique sur silicium
FIREFLIES "FLEXIBLE RELAYING IN INTERFERENCE-LIMITED CELLULAR NETWORK"	La communication cooperative est cruciale pour les réseaux mobiles d'avenir	Avec la théorie de l'information, nous trouvons une stratégie quasi-optimale
F-LAB "F-LAB : FÉDÉRATION DE MOYENS INFORMATIQUES"	Simplifier l'usage et l'accès à des plateformes expérimentales innovantes	Des standards pour une fédération globale et une solution clé en main
GENGHIS KHAN "TRANSISTORS GAN ET PACKAGING POUR APPLICATIONS TÉLÉCOMS JUSQU'À 40 GHz"	Amplification de puissance pour applications télécoms jusqu'à 40 GHz	Technologie InAlN / GaN sur SiC
GOSPEL "DIRECT GAP RELATED OPTICAL PROPERTIES OF GE/SiGe MULTIPLE QUANTUM WELLS"	Concepts innovants pour la photonique silicium	De l'étude des propriétés physiques à la démonstration d'un lien optique
GRECO "GREEN WIRELESS COMMUNICATING OBJECTS"	Le challenge de la conception de systèmes communicants autonomes en énergie	Une approche par simulation combinant des composants de nature hétérogène
HENIAC "RÉSEAUX OPTIQUES 400G / 1T À BASE DE CIRCUITS DAC ULTRA RAPIDES"	L'électronique ultra rapide au cœur de l'internet très haut débit du futur	Le phosphore d'indium, un matériau toujours clé pour l'optoélectronique du futur
HERODOTOS "HORLOGERIE RECONFIGURABLE POUR CIRCUITS MULTIPROCESSEURS SUR PUCE"	Variabilité des délais et difficulté de synchronisation globale sur puce	Liens locaux et utilisation des PLLs tout numériques
IMAGIT "ENVIRONNEMENT, MULTI-ACTEURS MULTI-TABLES INTERACTIVES À OBJETS TANGIBLES ET VIRTUELS"	Besoin de nouvelles méthodes d'interaction homme-machine	Vers la distribution de tables interactives avec manipulation d'objets tangibles

Acronyme et titre	Le pourquoi	Le comment
INCOME "INFRASTRUCTURE DE GESTION DE CONTEXTE MULTI-ÉCHELLE POUR L'INTERNET DES OBJETS"	Fournir des briques logicielles pour faciliter la réalisation de services IoT	Intergiciel publish / subscribe : filtrage multiéchelle et contrats de vie privée
INFRA-JVM "VERS UNE MACHINE VIRTUELLE JAVA POUR L'INFORMATIQUE OMNIPRÉSENTE"	La réservation de ressources est nécessaire pour l'informatique ubiquitaire	Un nouvel environnement d'exécution Java permettant de réserver les ressources
INSCOOP "INTÉGRATION DE NANOFILS III-V SUR SOI POUR CONNECTIONS OPTIQUES SUR PUCE"	Les nanofils III-V comme émetteurs de lumière pour la photonique sur silicium	Couplage optique d'un réseau de nanofils III-V et d'un guide d'onde Si sur SOI
INSPIRE "INJECTION DE SPIN POUR L'ÉMISSION DE LUMIÈRE POLARISÉE"	Convertir un bit d'aimantation en lumière polarisée	Injecter, propager et détecter un courant de spin dans des semi-conducteurs III-V
ITEMIS "SYSTÈMES D'INFORMATION ET EMBARQUÉS INTÉGRÉS"	Haute hétérogénéité des constituants des systèmes et leurs besoins d'évolutivité	Méthodologie outillée de réalisation de systèmes multi-segments vérifiés
JASMIN "TRANSCIVEURS RÉALISÉS PAR INTÉGRATION MONOLITHIQUE POUR LES RÉSEAUX ET SERVICES"	Un récepteur plus sensible pour doubler le nombre d'abonnés connectés à internet	Utiliser la filière ruban enterré / ruban profond pour réaliser le SOA
LOW IQ "MMIC ULTRA FAIBLE CONSOMMATION POUR TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES EN BANDE Q"	Briser la fracture numérique pour les utilisateurs isolés	Développer de nouvelles technologies HEMT nanométriques et de nouveaux matériaux
MAPREDUCE "TRAITEMENT INTENSIF DE DONNÉES SUR DES INFRASTRUCTURES CLOUD ET HYBRIDES"	Des traitements de données plus performants face aux défis du Big Data	Efficacité et résilience en gérant mieux les données et les méta-données
MARS "SYSTÈMES EMBARQUÉS FIABLES ET FAIBLE CONSOMMATION À BASE DE MÉMOIRES MAGNÉTIQUES (MRAM)"	De nouvelles mémoires pour les systèmes embarqués	Concevoir de nouveaux systèmes embarqués à l'aide de mémoires magnétiques
METAPHORT "VERS DES SOLUTIONS D'ANTENNES INNOVANTES À MÉTAMATÉRIAUX POUR LE FERROVIAIRE"	Le remplacement des matériaux métalliques par des matériaux composites	Techniques de conception d'antennes innovantes à base de métamatériaux
MICROS "RÉCEPTEUR OPTIQUE COHÉRENT À FORMAT DE MODULATION MULTI-NIVEAUX INTÉGRÉ SUR CMOS"	Réaliser un récepteur cohérent de type PDM-QPSK intégré sur silicium	Intégration photonique silicium
MIDISTOCK "INTÉGRATION DE MICRO-DISPOSITIFS INNOVANTS DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE EMBARQUÉE"	Traiter la problématique du stockage de l'énergie embarquée	Intégrer des électrolytes et des matériaux nano-structurés innovants
MIGRAQUEL "ÉLECTRONIQUE QUANTIQUE MICROONDE GRAPHÈNE"	Revisiter l'électronique rapide avec des fermions de Dirac	Concevoir des architectures électroniques adaptées au graphène
MOANO "MODÈLES ET OUTILS POUR APPLICATIONS NOMADES DE DÉCOUVERTE DE TERRITOIRE"	Répondre aux besoins d'utilisateurs finaux dans leurs activités quotidiennes	Communication continue et à plusieurs niveaux

Acronyme et titre	Le pourquoi	Le comment
MODULE "SOURCE OPTIQUE INTÉGRÉE À MODULATION DUALE POUR RÉSEAUX LOCAUX ET MÉTROPOLITAINS"	Étude de la modulation duale d'une source optique intégrée	Expérimentation système du D-EML conçu et fabriqué par le consortium
NASTAROD "DISPERSIONS DE NANOPARTICULES POUR LES COMPOSANTS OPTIQUES RECONFIGURABLES"	Démontrer que les dispersions de nanoparticules ont un potentiel applicatif élevé en optique	Modifier le matériau pour l'adapter à la fonction optique visée
OPTIMACS "CANEVAS D'OPTIMISATION DE REQUÊTES BASÉ SUR LA COMPOSITION DE SERVICES"	Services pour l'accès aux données dans des environnements dynamiques	Convergence entre l'optimisation adaptative de requêtes et les services
PARADHOQS "PARAMETRIC DEVICES TO HANDLE OPTICAL QUANTUM STATES"	Implémenter en fibre optique des transformations unitaires pour les photons	Lasers à décalage de fréquence intra-cavité et filtrage optique
PARTOUT "PARALLÉLISME PARTOUT"	Le parallélisme est partout : comment le programmer de manière efficace et sûre ?	Notre approche : la programmation réactive "correcte par construction"
PETAFLOW "CALCULS INTENSIFS, VISUALISATION SCIENTIFIQUE ET TRANSFERT HAUT DÉBIT INTERNATIONAL POUR DES DONNÉES D'ÉCHELLE PETA : APPLICATION À L'ÉCOULEMENT DANS LES VOIES SUPÉRIEURE DE L'HOMME"	Technologies de communication de haute performance pour le calcul intensif	Visualisation scientifique des données obtenues de calcul intensif avec le réseau transcontinental PetaFlow
PIMI "PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE DÉPLOIEMENT D'ESPACE PERSONNEL D'INFORMATIONS"	Partage des Informations Personnelles avec des e-services de confiance	Approche scientifique multidisciplinaire
PLATA "PLATEFORME TÉLÉMATIQUE MULTISTANDARD PROGRAMMABLE POUR L'AUTOMOBILE"	Architecture véhiculaire multistandard pour l'assistance au conducteur	Plateforme radio logicielle multi-technologies pour des applications véhiculaires
QSCALE "QUANTUM TECHNOLOGIES FOR EXTENDING THE RANGE OF QUANTUM COMMUNICATIONS"	Les répéteurs quantiques : vers des communications quantiques à longue distance	Développer des composants photoniques et atomiques pour les réseaux quantiques
REAGAN "CARACTÉRISATION PHYSIQUE ET ÉLECTRIQUE DE LA FIABILITÉ DE TECHNOLOGIES GAN"	Identifier la cause racine des mécanismes de dégradation des transistors GaN	Relier la signature électrique d'une défaillance de circuit à un défaut physique
REC-EM "RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE ÉLECTROMAGNÉTIQUE"	Augmenter l'autonomie en énergie en récupérant l'énergie électromagnétique	Collaborer entre chercheurs universitaires aux compétences complémentaires
RESCUE "RÉSEAU COORDONNÉ DE SUBSTITUTION MOBILE"	Un réseau de substitution pour venir en aide à un réseau en difficulté	Utilisation de la mobilité pour créer de la ressource réseau
REVILABA "RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE VIBRATOIRE LARGE BANDE"	Récupérer l'énergie vibratoire ambiante	Développement de générateurs large bande à haute densité de puissance

Acronyme et titre	Le pourquoi	Le comment
ROBUST "OPTIMISATION FIABILISÉE DES TRANSISTORS BIPOLAIRES INP SUBMICRONIQUES EN VUE DE LA CONCEPTION ROBUSTE DES TRANSMISSIONS OPTIQUES 112 GB/S"	Rétroaction de la conception de circuits robustes en technologie submicronique	Conception et réalisation de transistors bipolaires submicroniques
ROBUST FPGA "CONCEPTION D'UN FPGA TOLÉRANT AUX DÉFAUTS"	Répondre au besoin de rendre industriellement exploitables les FPGA défectueux	Agir sur la structure et la manière d'exploiter les ressources du FPGA
RUBY "RADIO UWB POUR LES RÉSEAUX CORPOREL"	Démontrer la pertinence d'une architecture radio UWB particulière pour les BAN	Démontrer par l'expérience la pertinence de l'architecture bi-récepteur de RUBY
SACSO "SOLUTION POUR L'AUTO-ADAPTATION IN SITU DE SYSTÈMES COMMUNICANTS"	Rendre un circuit intégré auto-adaptatif à son environnement applicatif	Cas d'études complémentaires (santé, sécurité, com...), vers une solution générique
SATELLITE "PROCESS BASÉ SUR LE GAN POUR DES APPLICATIONS EN ONDES MILLIMÉTRIQUES"	Des circuits encore jamais commercialisés	Un travail de fond sur le matériau et la technologie
SEDIMOS "SINGLE ELECTRON DEVICE INTEGRATION ON CMOS TECHNOLOGY"	Besoin de nouveau composant pour l'électronique ultra basse consommation	Développement simultané de la technologie et des outils de conception
SIPOWLIGHT "CONTRÔLE OPTIQUE INTÉGRÉ POUR LES SEMICONDUCTEURS DE PUISSANCE"	Proposer des solutions optiques intégrées en électronique de puissance	Intégration monolithique et hybride pour la gestion de l'énergie
SO FAST "SOURCE OPTIQUE FIBRÉE POUR APPLICATIONS AUX SYSTÈMES TÉLÉCOMS"	Concevoir des sources optiques entièrement fibrées à très hautes cadences	Compression non linéaire d'un battement sinusoïdal au sein d'une fibre optique
SOCEDA "PLATE-FORME EDA SOCIALE, LARGEMENT DISTRIBUÉE POUR L'INFORMATIQUE DANS LES NUAGES"	Collecter et gérer les événements de services à l'échelle d'internet	Combiner un middleware, un CEP et un filtre social à de la surveillance
SOLICRISTAL "DYNAMIQUE DES GRANDS ENSEMBLES DE SOLITONS DISSIPATIFS EN CAVITÉ LASER"	Solitons dissipatifs en interaction : une physique nouvelle riche de perspectives	Caractérisation et contrôle de dynamiques ultrarapides complexes : le challenge
SOP "PENSER SERVICE GLOBAL POUR LES ORDINATEURS PERSONNELS"	Gestion et accès aux logiciels d'un ordinateur comme sur un smartphone	Une plateforme hybride "verte"
SPADES "SERVICING PETASCALE ARCHITECTURES AND DISTRIBUTED SYSTEM"	Besoin de gérer un accès transparent à un très grand nombre de processeurs	Mise en œuvre de l'intergiciel SBAMUn intergiciel de découverte de services
SWEET-HOME "SYSTÈME DOMOTIQUE D'ASSISTANCE AU DOMICILE"	Apporter une assistance à l'utilisateur par une commande vocale de la domotique	Développer et évaluer des outils dans une approche écologique centrée humain

Acronyme et titre	Le pourquoi	Le comment
SYSRECAP "SYSTÈME DE MESURE BAS COÛT À BASE DE CAPTEUR INTÉGRÉ MULTIFONCTION RECONFIGURABLE"	Mesurer la pression, température, (...) avec un unique capteur	Concevoir deux capteurs résistif et capacitif multifonctions en SOIMUMPS
TELDOT "TELECOM APPLICATIONS BASED ON QUANTUM DOT DEVICES"	Une nouvelle génération de sources lasers à BQs pour les réseaux télécoms	Circuit photonique intégré à base de BQs pour la génération de sources WDM
TRIMARAN "TIME-REVERSAL MIMO OFDM GREEN COMMUNICATIONS BASED ON MICRO-STRUCTURED ANTENNAS"	Des antennes intelligentes pour focaliser au lieu de couvrir	Antennes à microstructures compactes et algorithmes MAC / PHY innovants
TROUP WILMA "TRANSPORT AND ROUTING PROTOCOLS FOR WIRELESS AND MOBILE AD HOC NETWORKS"	Pour l'efficacité de communications directes entre utilisateurs mobiles	Codage et réseaux sociaux mobiles, modélisation, tests sur données réelles
UBIQUEST "PROTOCOLES ORIENTÉS DONNÉES POUR DES RÉSEAUX SANS FIL MULTI-SAUT"	Le codage des applications du réseau sans fil multi-saut constitue un défi	La gestion du réseau et des données est réalisée via des requêtes distribuées
ULTRAWIDE "AMPLIFICATEUR INTÉGRÉ ULTRA-LARGE-BANDE POUR SYSTÈMES OPTIQUES"	Tripler la capacité de transport sur fibre optique pour le trafic internet	Amplificateur optique ultra large bande pour systèmes de transmission haut-débit
VIPEER "INGÉNIERIE DU TRAFIC VIDÉO EN INTRA-DOMAIN BASÉE SUR LE PAIR À PAIR"	Améliorer la distribution vidéo sur internet sans sur-dimensionner les réseaux	Ajouter de l'intelligence au réseau pour mieux distribuer la vidéo
WENDY "WIGIG FLEXIBLE TRANSCEIVER ADVANCED SYSTEM"	Intégration des standards WiFi et WiGig dans un même système configurable	Démonstration d'architectures innovantes en technologies CMOS avancées
WITH "WIRELESS COMMUNICATION USING TERAHERTZ PLASMONIC-NANO ICT DEVICES"	Le haut débit sans fil avec les ondes THz	Maîtrise des composants Téraherz avancés pour repousser les limites



LES AUTEURS

ET LEURS CONTRIBUTIONS



FATIHA BOUJDAINE - *Chargée de projets scientifiques à l'ANR depuis 2013*

Fatiha Boujdaine, chargée de projets scientifiques à l'ANR depuis 2013. Elle a soutenu un doctorat sur le thème de l'évaluation et optimisation des performances des réseaux de télécommunications. Elle a effectué ensuite un post-doc à l'université de Dijon. Elle a également obtenu un mastère en management de projet et innovation technologique et a été chargée de projets R&D chez un opérateur télécoms, avant de rejoindre l'ANR.



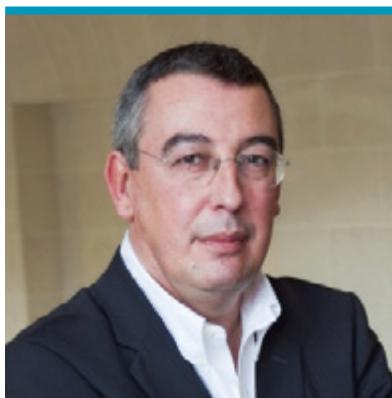
NAZIM AGOULMINE - *Professeur à l'Université d'Évry Val d'Essonne (France)*

Nazim Agoulmine (SM IEEE, Fellow FTRA) est professeur à l'Université d'Évry Val d'Essonne (France). Il est titulaire d'une maîtrise et d'un doctorat obtenus respectivement en 1989 et 1992 à l'Université de Paris XI - Orsay (France). Il détient également un diplôme d'ingénieur de l'Institut d'Électronique de l'Université USTHB en 1988 (Algérie) et d'un diplôme d'études approfondies en économie de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines en 1996. Il mène ses activités de recherche au sein du laboratoire IBISC de l'Université d'Évry Val d'Essonne où il codirige l'équipe COSMO. Ses thèmes de recherche sont le cloud computing et networking, la convergence des technologies réseaux et systèmes, les réseaux à large bande, l'Internet des objets, les réseaux autonomes. Depuis 2016, Il est le chair du comité technique de l'IEEE / ComSoc sur le eHealth. Entre 2011 et 2016, il a été en délégation à l'Agence Nationale de la Recherche où il a coordonné les programmes de recherche sur les infrastructures logicielles et matérielles du futur (INFRA et VERSO), sur l'ingénierie des systèmes numériques et la sécurité (INS). Il a également codirigé puis dirigé pendant cette période le département Numérique et Mathématique de l'ANR. Nazim Agoulmine a publié plus de 200 articles de recherche dans des revues et conférences internationales, il est coauteur de quatre ouvrages dans le domaine des réseaux et des systèmes multimédias. Il a reçu plusieurs distinctions pour ses contributions scientifiques et ses activités pour la communauté scientifique.



OLIVIER AUDOUIN - *Directeur des affaires externes, Nokia
Bell Labs France et membre de comité de pilotage ANR*

Olivier Audouin est diplômé de l'ENSERB (École Nationale Supérieure d'Électronique et de Radioélectricité de Bordeaux) en 1988. Il rejoint Alcatel en 1989 et travaille sur la conception des liens optiques transocéaniques. De 2004 à 2006, il est responsable de l'équipe de recherche "Packet Transport Infrastructure". Ses domaines de recherche concernent alors l'architecture réseau, les protocoles, les algorithmes d'optimisation réseau, la simulation des réseaux. De 2006 à 2009, il est coordinateur du projet CARRIOCAS (Réseau Optique haut débit pour le calcul distribué) regroupant 24 partenaires dans le cadre du pôle Systematic. Depuis 2009, il occupe le poste de Directeur des affaires externes de Nokia Bell Labs France, en charge de la coordination des partenariats de recherche et des relations avec les écosystèmes collaboratifs. Il est membre du comité de pilotage du groupe télécom du pôle Systematic, membre du conseil d'administration du pôle Cap Digital, membre du board du cluster Eureka ITEA, membre du "core group" du cluster Eureka CELTIC, membre du comité de pilotage scientifique de l'ANR pour le défi "Société de l'information et de la communication" et co-directeur du laboratoire de recherche commun entre Nokia et Inria.



JEAN-LUC BEYLAT - *VP Ecosystems & Market Enablers de Nokia et Président
de Systematic Paris-Region, membre de comité de pilotage ANR*

Jean-Luc Beylat est VP Ecosystems & Market Enablers chez Nokia, il est Président d'Alcatel-Lucent Bell Labs France et Président du Pôle de compétitivité Systematic Paris-Region, fort de 800 membres et de plus de 2,5 Mds€ investis en recherche et développement. Également, Jean-Luc Beylat a été élu le 16 décembre 2013, président de l'Association Française des Pôles de Compétitivité. Jean-Luc rejoint Alcatel en 1984 et travaille sept ans sur les lasers à semi-conducteurs au centre de recherches Alcatel à Marcoussis (France). En 1992, il lance les activités de transmission multiplexée en longueur d'onde (WDM) d'Alcatel qui permettent d'accroître le débit du réseau Internet, et en 1996, il est nommé Directeur du département systèmes et réseaux optiques du centre de recherches, responsable au niveau mondial des activités de recherche en transmissions terrestre et sous-marine. En 2000, il rejoint le groupe d'activités Optique d'Alcatel en tant que directeur de programme puis de Vice-président des solutions réseaux, puis en 2003 la direction technique du groupe en charge des programmes de partenariat. Jean-Luc Beylat est titulaire d'un doctorat de physique de l'Université Pierre et Marie Curie. Il est membre du Conseil d'Administration de l'IRT SystemX, du Conseil d'administrations de Paris-Region Entreprise et du comité exécutif de l'European Institute of Innovation & Technology (EIT) Digital. Depuis février 2015, il est expert auprès de la commission Européenne au sein du Connect Advisory Forum (CAF). Enfin, Il a co-créé et préside le comité d'organisation du Prix Jean Jerphagnon. Il a co-présidé, avec Pierre Tambourin, le rapport intitulé "L'innovation : un enjeu majeur pour la France" rendu au gouvernement en avril 2013.



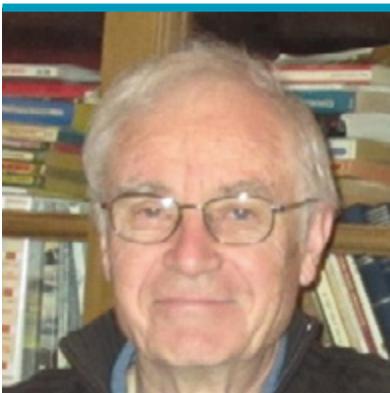
MICHEL DAYDÉ - *Directeur de l'IRIT et Délégué scientifique au CNRS en charge du calcul haute performance*

Michel Daydé a soutenu sa thèse de Doctorat en Informatique à l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) en 1986. De 1987 à 1995, il a effectué un post-doctorat puis a été "Visiting Senior Scientist" dans le "Parallel Algorithms Group" au CERFACS. Depuis 1988, il a été successivement Maître de Conférences puis Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique, d'Hydraulique et de Télécommunications (ENSEEIH) de l'INPT. Il a obtenu son Habilitation à Diriger des Recherches en 1996 et effectue ses recherches dans l'équipe "Algorithmes Parallèles et Optimisation" à l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT). Il est Directeur de l'IRIT depuis Juillet 2011 après en avoir été Directeur-adjoint entre 2001 et 2011. Il est Délégué scientifique au CNRS / INS2I en charge du Calcul Haute-Performance, des grilles et du Cloud depuis Janvier 2010 et directeur du Comité d'Orientation pour le Calcul Intensif au CNRS (COCIN). Ses centres d'intérêts en recherche portent sur le calcul parallèle, les grilles de calcul et le Cloud, le calcul haute-performance, les noyaux de calcul, l'algèbre linéaire, les problèmes d'optimisation de grande taille et le portage de codes industriels sur les infrastructures de calcul.



ÉRIC FLEURY - *Professeur à l'École Normale Supérieure de Lyon, titulaire d'une Chaire Inria et responsable de l'équipe de recherche DANTE*

Éric Fleury est professeur des universités à l'École Normale Supérieure de Lyon et titulaire d'une chaire Inria. Il est membre du laboratoire LIP (Laboratoire de l'Informatique du Parallélisme) où il dirige l'équipe projet commune Inria DANTE dont le but est de mettre en œuvre des outils scientifiques et des méthodologies génériques pour caractériser et modéliser les réseaux dynamiques. Éric Fleury est délégué scientifique adjoint du centre de recherche Inria Grenoble Rhône Alpes. Il est membre du comité de direction de l'IXXI (Institut Rhônalpin des systèmes complexes), membre du comité exécutif du LABEX MILYON et il a été directeur du département informatique de l'ENS de Lyon. Il a été le président de l'appel INFRA de l'ANR de 2012 à 2013 et vice-président en 2011. Il est responsable scientifique de FIT IoT LAB. FIT est l'un des 52 projets lauréats de la première vague d'appel à projets "Équipements d'Excellence" (Equipex) des Investissements d'avenir.



CHRISTIAN RUMELHARD - *Professeur CNAM honoraire Conservatoire National des Arts et Métiers*

Il a créé un laboratoire Circuits Intégrés Monolithiques Microondes (MMIC) au Laboratoire Central de recherche de Thales puis il a participé au développement de ces MMIC à UMS. En 1992, il est devenu titulaire de la chaire de Physique des Composants Électroniques au CNAM. Il a participé à la création et a été directeur de l'Équipe Systèmes de Communication et Microsystèmes (ESYCOM), commun au CNAM, à l'Université de Marne-la-Vallée et à l'ESIEE. Ses activités de recherche y étaient dans le domaine Photonique et Microondes. Il a été General Chairman de European Microwave Week à Paris en 2000. Il est auteur ou co-auteur de plusieurs ouvrages sur les MMIC et est co-auteur du livre "Microwave Photonic Links" (2011).



VALÈRE ROBIN - *Directeur technique Architecture, sécurité et enablers Orange labs*

Diplômé de l'École Polytechnique et l'École Nationale Supérieure des Télécommunication, Valère Robin a commencé sa carrière en 1985 comme ingénieur de recherche au Centre National d'Études des Télécommunications où il a travaillé sur les systèmes répartis pour la commutation, la télématique, les réseaux intelligents, les bases de données distribuées et la gestion de réseaux. Il participa au consortium international TINA sur la convergence entre informatique et télécoms. Il fut ensuite responsable des programmes pour la Division de France Télécom R&D consacrée au génie logiciel, aux systèmes distribués et à la sécurité. En 2004 il devint responsable de la stratégie et la recherche puis directeur-adjoint du Centre de R&D sur les middlewares et les plates-formes de services avancées, chargé notamment du développement des services web, des portails et des services de distribution de contenus. Depuis 2012, il est responsable de la stratégie technique sur l'architecture, la sécurité et les enablers au sein de la Division Produits et Services des Orange Labs. Partisan de longue date des approches basées sur le logiciel libre, il contribua au lancement du consortium Objectweb et à la transformation en OW2, un consortium international dédié aux solutions en logiciel libre pour les middlewares, le cloud, les systèmes d'information, le big data, la sécurité... Il représente actuellement Orange dans la gouvernance du PPP européen Big Data Value et de l'ETP NESSI sur le logiciel, le cloud, les données et les services.

Conception et coordination éditoriale : Fatiha Boujdaine, Marie Fillon et Julie Gielen en collaboration avec Nazim Agoulmine

Conception et réalisation graphiques : Agence Zébra

Impression : Imprimé en France par l'imprimerie Mérico

Ce document est imprimé par une entreprise certifiée Imprim'vert avec des encres végétales sur un papier 100% recyclé certifié FSC et Ecolabel européen - "Gratuit ne peut être vendu"



MIXTE
Papier issu de
sources responsables
FSC® C015638



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

www.anr.fr



Twitter@agencerecherche •  ANR

Direction du développement, de l'information et de la communication