

LIVRE BLANC



MODÈLES, DATA ET ALGORITHMES : LES NOUVELLES FRONTIÈRES DU NUMÉRIQUE

Comment les technologies mathématiques de modélisation, simulation et optimisation révolutionnent l'expérience client, la compétitivité et la croissance des PME

Pour en savoir plus :
www.pme-bigdata.org
contact@aremus-associes.com

www.bpifrance-lelab.fr

Sous la direction d'Étienne de Rocquigny

Avec la participation de...

Coordination : Étienne de Rocquigny (**Aremus & Associés**)

Contributeurs : Matthieu Domain (**Aremus & Associés**), Jérémie Wainstain (**Aremus & Associés / TheGreenData**), Marine Nessi (**Aremus & Associés**), Tiphaine Bith (**AMIES**), Stéphane Cordier (**AMIES**), Richard Fontanges (**AMIES**), Edwige Godlewski (**AMIES**), Jean-Christophe Gougeon (**Bpifrance**), Élise Tissier (**Bpifrance**), Thomas Palychata (**GENCI**), Stéphane Requena (**GENCI**), Catherine Rivière (**GENCI**), Frédéric Lefebvre-Naré (**Cabinet ISÉE**).

Aremus & Associés a pour vocation d'accélérer les entreprises de croissance par les modèles, la transition digitale et la transition durable, en accompagnant les entrepreneurs et dirigeants en conseil et investissement en capital.

AMIES, Agence Maths-Entreprises, est un projet national coordonné par le CNRS, en partenariat avec l'Université Grenoble-Alpes et Inria. Sa mission est de faciliter et de susciter des partenariats reposant sur les mathématiques, entre les entreprises françaises et le monde académique.

Bpifrance accompagne les entreprises pour voir plus grand et plus loin, et faire émerger les champions de demain. De l'amorçage jusqu'à la cotation en bourse, du crédit aux fonds propres, **Bpifrance** offre des solutions de financement adaptées à chaque étape clé de la vie de des entreprises.

GENCI (Grand Équipement national de Calcul intensif), société civile dont la mission est de mettre à disposition des scientifiques français, les meilleurs moyens de calcul intensif et promouvoir l'utilisation de la simulation numérique auprès de la recherche académique et des industriels, notamment les PME.

Cette étude n'aurait pu être menée sans l'accueil fourni par des centaines de dirigeants d'entreprises ayant accepté de répondre aux enquêtes et / ou interviews dont nous ne citons ci-après qu'une liste non-exhaustive :

Remerciements :

Ronan Bars & Éric Jacquet-Lagrèze (**Eurodécision**), Zafar Baryali (**DesBrasEnplus**), Arnaud Legrand (**Energiency**), Philippe Wagner (**Captain Contrat**), Christophe Meunier-Jacob (**SaveCode**), Nathalie Olszewski (**Bourbon**), Benoît Boiron (**ID Logistics**), Stéphane Brault (**Neteven**), Jean-Luc Ayrat (**Force A**), Bruno Verplancken (**Neoparking**), Édouard-Antoine Filipe (**Tronics**), Nicolas Nollet (**Renault**), Benoît Oberlé (**Sirdata**), Renaud Laborde (**OpenOcean**), Jean-Marie Nessi (**Nessi consulting**).

Rédaction / édition : Lise de Rocquigny - Montmarin, Agence **Com-ette**.

En quelques mots...

Les modèles, les données et les algorithmes sont au cœur de la guerre compétitive actuelle.

Pourquoi ? Parce qu'ils ont la capacité de transformer l'expérience client, tout en optimisant la productivité des entreprises. Aujourd'hui, 80 % des PME n'ont pas conscience de cette réalité. Aujourd'hui, tout est en place pour qu'elles puissent en profiter pleinement.

Un peu d'histoire

- Il y a 10 ans, lorsque l'on parlait de transition numérique des PME, il s'agissait de numériser les processus et fluidifier les flux d'information entre les équipes, les clients et les fournisseurs. Le numérique était alors perçu comme un moyen de mieux communiquer, collaborer et automatiser les tâches ingrates des tuyaux et des automates. C'était il y a 10 ans.
- Depuis, le développement massif d'internet, l'explosion des capacités de calcul disponibles et le déluge de données connectées, ont fait reculer la frontière du numérique. De nouvelles opportunités surgissent.
- Désormais, la promesse est celle de la « transformation » plutôt que de « l'optimisation ». Les modèles mathématiques et algorithmes couplés aux systèmes d'information remodelent de fond en comble les métiers traditionnels et transforment la manière d'adresser et de livrer le client. Ils vont, sans doute, radicalement changer les **business models** traditionnels.

Vous avez dit algorithmes ?

Google, AirBnB, Uber, Amazon, Netflix, Criteo, Climate Corporation et tant d'autres...

Derrière les réussites les plus radicales du numérique se cachent des algorithmes mathématiques puissants, capables de révolutionner l'expérience client et d'optimiser la productivité de l'entreprise. Que serait Amazon sans ses algorithmes de prévision et de recommandation ?

Que serait Uber sans ses algorithmes de *pricing* et d'optimisation prédictive ?

Les mathématiques sont au cœur de ces réussites. Elles créent de la valeur grâce à une expérience utilisateur renouvelée, couplée à un processus opérationnel sans faille.

Notre étude annonce une bonne et une mauvaise nouvelle.

Mauvaise nouvelle : 80 % des PME que nous avons interrogées n'ont pas conscience de la menace que présente cette « nouvelle frontière du numérique ». 80 % des PME n'ont pas pris conscience de l'opportunité d'améliorer leur compétitivité, de remonter leurs marges, de proposer de nouveaux services et de fidéliser leurs clients au risque de se faire doubler par une concurrence, plus audacieuse, plus prompte à utiliser les technologies algorithmiques, qui prend une longueur d'avance difficilement rattrapable.

Bonne nouvelle : la France possède aujourd'hui tous les ingrédients nécessaires pour libérer le potentiel de la modélisation et des algorithmes prédictifs dans les PME. Les compétences sont là. Les idées ne manquent pas. Les Français sont parmi les meilleurs du monde en mathématiques, ingénierie système et innovation digitale. À condition de savoir mettre en œuvre rapidement et là où cela crée la valeur maximale...

I. MODÈLES ET ALGORITHMES DE BABYLONE AU DIGITAL DE QUOI S'AGIT-IL ? A QUOI CELA SERT-IL ?	
1.1 4 000 ANS D'HISTOIRE D'INNOVATION DE RUPTURE AU CŒUR DE L'ÉCONOMIE	14
1.2 MODÈLES - DE QUOI PARLE-T-ON AUJOURD'HUI ?	16
1.3 LES MODÈLES ET ALGORITHMES AU CŒUR DE LA TRANSITION NUMÉRIQUE, MAIS SOUVENT ENFOUIS ET LARGEMENT SOUS-EXPLOITÉS	19
II. DES TECHNOLOGIES AU CŒUR DU FINANCEMENT PUBLIC DE LA R&D DANS DES SECTEURS HISTORIQUES LIMITÉS	
2.1 DOMAINES D'APPLICATION HISTORIQUES ET TENDANCES ACTUELLES DE MARCHÉS	23
2.2 BRIQUES ET SOLUTIONS - STRUCTURATION DE L'OFFRE ET ACTEURS EXISTANTS	26
2.3 NOTRE ENQUÊTE EXPLORATOIRE SUR 10 ANS DE FINANCEMENT PUBLIC FRANÇAIS (FUI, LES AIDES À L'INNOVATION DE BPIFRANCE, OU CRÉATION D'ENTREPRISES...)	30
2.3.1 Un poids décisif dans le financement public français.....	30
2.3.2 Un financement sectoriel laissant encore de vastes secteurs de l'économie à explorer	32
2.4 UNE CLÉ D'ANALYSE : LE DOMAINE DE CRÉATION DE VALEUR	34
III. ET LES PME DANS TOUT ÇA ? LES ENSEIGNEMENTS DES EXPÉRIMENTATIONS ET DES ENQUÊTES RÉCENTES	
3.1 UNE INITIATIVE PIONNIÈRE : RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PROGRAMME HPC-PME GENCI (DEPUIS FIN 2010)	41
3.1.1 Premiers résultats obtenus.....	42
3.1.2 Retour d'expériences	46
3.2 UN APPEL À PROJET PERMANENT PROPOSÉ PAR AMIES	48
3.3 UNE ENQUÊTE À DEUX NIVEAUX, RÉALISÉE AUPRÈS DES TPE - PME	52
3.4 NOS ENQUÊTES QUALITATIVES : QU'EN PENSENT LES PME ET QUE FONT-ELLES CONCRÈTEMENT ?	55
3.4.1 Périmètre et maturités sectorielles.....	55
3.4.2 Bâtiment	57
3.4.3 Agriculture	58
3.4.4 E-commerce et publicité digitale.....	60
3.4.5 Industrie et énergie.....	61
3.4.6 Services.....	62
3.4.7 Média et Édition	63
3.4.8 Transport	64
3.4.9 Télécom.....	65
3.4.10 Assurances.....	66
3.4.11 Synthèse.....	67
IV. OCÉAN BLEU : MODÈLES ET ALGORITHMES AU CŒUR DE LA DISRUPTION DIGITALE ENTREPRENEURIALE	
4.1 AU CŒUR DE LA TRANSITION DIGITALE, LES MODÈLES ET ALGORITHMES PERMETTENT LA DÉSINTERMÉDIATION MASSIVE ET LA SCALABILITÉ	71
4.1.1 Des technologies constitutives des nouveaux géants du numérique.....	71
4.1.2 L'algorithmique permet une relation intime et « apprenante » à des clients en masse	73
4.1.3 La modélisation est essentielle à la scalabilité des nouveaux business models	76
4.2 LA MODÉLISATION DEVIENDRA-T-ELLE UNE COMMODITÉ ?	77
4.3 ET CE N'EST PAS FINI : OBJETS CONNECTÉS ET IMPRIMANTES 3D VONT ENCORE ACCENTUER CES TENDANCES	78
4.4 UN OCÉAN D'OPPORTUNITÉS ENTREPRENEURIALES QUI RÉCLAME UNE NOUVELLE APPROCHE : CENTRÉE SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX, LA DATA, LE PROBABILISTE.....	78
LEXIQUE	89
BIBLIOGRAPHIE ET SOURCES.....	90

Résumé des enquêtes et propositions

Au cœur de la transition digitale, transformant l'essentiel de l'économie, des opportunités de croissance et de différenciation associées, se trouvent les technologies des modèles et algorithmes, à savoir la modélisation, la simulation et l'optimisation de nature mathématique, informatique, ou numérique en général ; la France y dispose d'atouts technologiques de niveau mondial. Synthèse d'enquêtes qualitatives et quantitatives sur des centaines d'entreprises, le présent Livre Blanc explore les horizons de croissance au-delà des actifs historiques (grandes industries, énergie, transport...).

Ces technologies occupent une place fondamentale dans le financement public de la R&D et de l'innovation en France, avec près de 40 % des financements pour les actions les plus en amont (projets collaboratifs tel que FUI, Fonds unique interministériel), et probablement plus de 15 % pour les financements aval (projets d'aide à l'innovation et concours de création d'entreprises).

Pourtant, l'analyse montre que les domaines d'application associés se limitent trop souvent à une petite partie de l'océan d'opportunités : au-delà des cibles historiques que sont la grande industrie ou les services financiers, et d'une première vague *Big Data* essentiellement centrée sur les données marketing et consommation, un large potentiel est sous-exploité : qu'il s'agisse de secteurs économiques (services aux entreprises, agriculture, bâtiment, services à la personne...), de types d'entreprises et/ou fonctions non technologiques des entreprises.

Quid de l'adoption de ces technologies par les PME et ETI ?

Alors que celles-ci représentent plus de 50 % de l'économie française, les financements et initiatives d'avant-garde ont principalement concerné une petite fraction d'éditeurs, de *techno-providers* de modélisation ou de sous-traitants de grands industriels. Pourtant nos enquêtes montrent une appétence non satisfaite pour de nombreux sondés, souvent faute de compétences en interne. L'intérêt stratégique des modèles et algorithmes pour améliorer la productivité est majoritairement reconnu. Moins nombreuses sont les entreprises qui anticipent le fait que l'expérience client et la chaîne de valeur pourront également radicalement changer. Cette intuition n'est vive que dans les secteurs déjà exposés à la transition digitale (e-commerce, médias, publicité...).

Ces technologies sont, de fait, en train de devenir une infrastructure fondamentale pour une fraction rapidement croissante des créations d'entreprises et de *start-up* qui viennent « chahuter » les secteurs traditionnels. L'analyse montre le rôle des modèles, des données et algorithmes dans la « disruption » digitale de l'économie tout entière, à la fois en tant qu'actifs stratégiques des géants numériques existants et en tant qu'infrastructure décisive pour l'émergence accélérée de *start-up* ; celles-ci « déroutent » des chaînes de valeur entières, notamment les services. Le centre de gravité des technologies y évolue d'ailleurs fortement : depuis le calcul intensif, historiquement utilisé par des experts à forte dose de sciences de l'ingénieur en allant vers le stochastique et l'apprentissage (*machine learning*) fortement piloté par les données (*data-centric*). Mais le plus important est le rôle décisif pris par l'expérience utilisateur radicalement outillée par les algorithmes.

“ En fait, tous les modèles sont faux mais certains sont utiles ”
 (Box & Draper, 1987)²

Nos principales propositions pour accélérer la création de valeur :

- 1 accélérer l'adoption par les PME / ETI des technologies de modèles et algorithmes : sensibiliser largement¹ et disséminer des tests accélérés au-delà des acteurs déjà adeptes du calcul ;
- 2 accroître le financement orienté vers la création de valeur à base algorithmique dans des domaines non technologiques ;
- 3 développer le capital investissement pour créer et soutenir des entreprises innovantes en rupture sur des métiers traditionnels, grâce aux modèles et algorithmes ;
- 4 observer les nouveaux usages et les meilleurs processus de création de valeur par les modèles et algorithmes *via* un observatoire alimenté par une initiative *Open Data*.

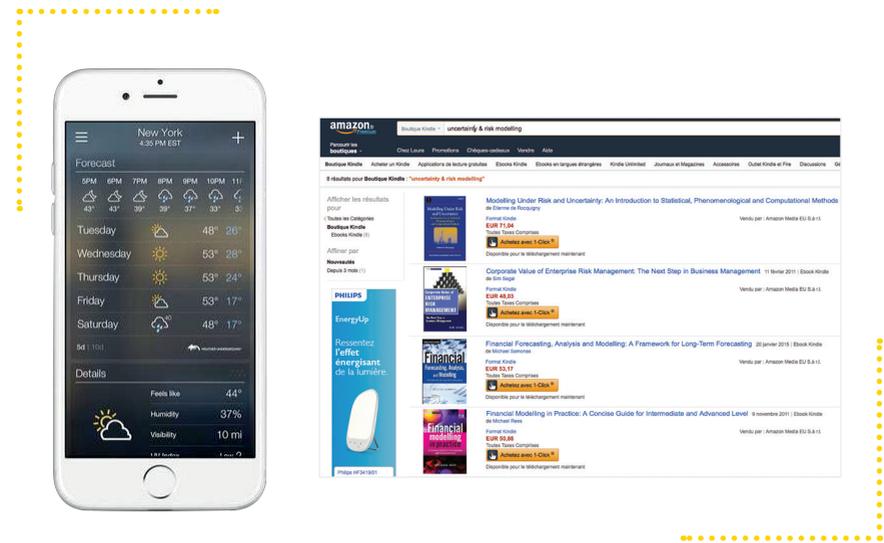


Figure 1 : Les modèles sont enfouis partout dans l'économie moderne... (crédits Apple, Amazon).

1. Noter que le plan « Industrie du futur », annoncé par Emmanuel Macron le 18 mai 2015, soutiendra une action GENCI / Teratec d'accompagnement national et régional des PME sur les volets simulation et calcul (lancement 2^e semestre 2015).

2. G. Box et N. Draper, *Empirical Model-Building and Response Surfaces*, John Wiley & sons, 1987.

MODÈLES ET ALGORITHMES DE BABYLONE AU DIGITAL

DE QUOI S'AGIT-IL ? À QUOI CELA SERT-IL ?

Par **modèle** ou **modélisation**, entendons tout procédé de représentation d'un système, d'un processus, permettant de « travailler » sur la réalité : un croquis, une carte géographique, une maquette à échelle réduite, un canevas de contrat, une imagerie, une classification ordonnée et bien évidemment tout modèle au sens logique, cognitif ou scientifique du terme et donc en particulier mathématique ou informatique.

Par **simulation**, entendons toute représentation **virtuelle** d'un objet, d'un système ou d'un processus au-delà d'une réalité observée et modélisée. C'est-à-dire la mise en mouvement d'un modèle pour explorer, expérimenter, combiner, tester, apprendre, s'entraîner, etc. C'est autant le simulateur de vol que l'exploration automatisée des combinaisons de fonctionnements possibles d'un logiciel, des configurations possibles, probables ou prédites d'un système décrit par un modèle logique d'équations ou de données observées, tout ceci faisant appel à du **calcul scientifique**.

Par **optimisation**, entendons tout processus ou algorithme destiné à améliorer les performances d'un système (matériel, social, virtuel...) vis-à-vis de critères quantitatifs donnés à partir d'un modèle préalable : il s'agit souvent de l'un des objectifs avancés d'une modélisation, la simulation accompagnant, très souvent, cette démarche d'optimisation.

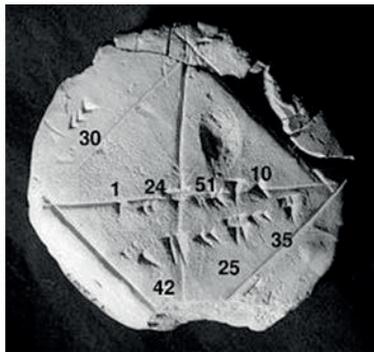
Leur point commun est de représenter – par définition de manière imparfaite³ – une réalité pour permettre de comprendre, d'imaginer, de comparer, d'entraîner, de concevoir ou de décider. Nous explorons, dans ce Livre Blanc, le cas important des **modèles de nature numérique**, notamment parce qu'ils sont répétables, systématisables et diffusables à très grand volume et à très bas coût. Ils s'appuient sur des concepts logiques, formels et calculatoires, donc mathématisables ; et partant de ce constat là, ils sont automatisables *via* l'intégration d'**algorithmes**, au sens de méthodes ou processus de résolution appliqués à des objets numériques, au carrefour des mathématiques et des sciences informatiques.

Les algorithmes permettent ainsi la mise en œuvre opérationnelle des modèles pour estimer, simuler, optimiser, visualiser, automatiser, etc., en s'appuyant sur une infrastructure de calcul de plus en plus massive, allant, dans certains cas, jusqu'au calcul « à haute performance » (HPC - *high performance computing*).

3. Penser à la carte parfaite et parfaitement inutilisable imaginée par J.L. Borges « (...) les Collèges de Cartographes levèrent une carte de l'Empire, qui avait le Format de l'Empire et qui coïncidait avec lui, point par point (...) », J.L. Borges, L'auteur et autres textes, Paris, Gallimard, 3^e édition, 1982.

1.1 4 000 ans d'histoire d'innovation de rupture au cœur de l'économie

Les tablettes babyloniennes témoignent déjà de procédés formels d'il y a 4 millénaires pour extraire des racines carrées, décisives pour le calcul, le contrôle et l'irrigation des surfaces agricoles qui occupaient probablement l'écrasante majorité du PIB et de la fiscalité de l'époque. Les procédés de résolution de modèles équationnels élémentaires, indispensables à la comptabilité agraire – et plus généralement aux affaires ainsi qu'au droit complexe des successions islamiques - prennent le nom « d'algorithmes » en hommage au traité de Al-Khuwarithmi du 9^e siècle après J.C.



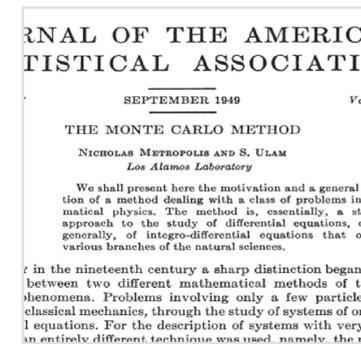
Babylone, c. 2000 avant J.C. الخوارزمي Baghdād, c. 820 après J.C.

Figure 2 : De Babylone, Baghdad, Mercator... jusqu'à Los Alamos (crédits Wikipedia).

Au 16^e siècle, le modèle de projection cartographique Mercator couplé aux algorithmes de mesurage et de calcul en navigation astronomique est l'une des innovations décisives pour le pilotage des explorations nautiques au grand large. Ce qui va rapidement bouleverser le commerce international, la finance, l'assurance, les mines, l'agriculture...



Devenue une véritable « infrastructure cognitive » sous-jacente aux grandes avancées scientifiques des 17^e, 18^e et 19^e siècles à travers la mécanique newtonienne, le pari pascalien et jusqu'à la rupture relativiste d'Einstein (décisive pour affiner les calculs des GPS), la modélisation donne naissance au milieu du 20^e siècle au premier ordinateur mondial : l'ENIAC de Von Neumann (1945). Il est utilisé pour simuler le comportement, et par là même, concevoir la bombe atomique.



L'invention concrète du premier ordinateur s'accompagne de la publication clé par Metropolis et Ulam d'un algorithme universel de simulation probabiliste et numérique (dit de « Monte-Carlo »). Celui-ci reste encore en 2015 l'un des plus utilisés au cœur des usages digitaux de la simulation numérique sur les ordinateurs les plus puissants (par exemple en météorologie dynamique) mais aussi les smartphones les plus massivement diffusés (par exemple en jeux vidéo, recommandation d'achat...).

1.2 Modèles – de quoi parle-t-on aujourd’hui ?

Le spectre des **modèles et algorithmes** ou technologies de **modélisation** (ou encore de **modélisation, simulation** et d'**optimisation**⁴) au sens du présent Livre Blanc, s’étend très largement à l’ensemble des outils théoriques et appliqués, de nature numérique en support à l’aide à la décision, la visualisation, l’optimisation, l’ingénierie et le contrôle. En d’autres termes, cela signifie :

- la modélisation des produits, procédés ou services par voie mathématique statistique (process, données...), numérique (résolution de modèles de sciences de l’ingénieur) et/ou informatique (graphes, sémantique, systèmes logiciels ou hybrides...);
- l’implémentation de ces modèles par des logiciels, systèmes d’information, bases de données... sur des machines de calcul, donc *a fortiori*, le calcul intensif (HPC);
- l’analyse, la visualisation et l’interaction avec les données, qui embarque de manière implicite des modèles (statistiques, numériques, informatiques...) et donc évidemment le domaine du *Big Data* en général.

4. Noter que pour certains auteurs, la modélisation, simulation et optimisation (sigle MSO) désigne plus étroitement le domaine de la modélisation mathématique en lien avec l’analyse numérique – excluant les domaines de l’analyse de données et la modélisation statistique, de l’ingénierie systèmes, du calcul HPC etc. – inclus dans l’acception générale des technologies de modélisation au sens du présent Livre Blanc (cf. figure 4).

La modélisation « outil » structurellement l’ensemble des processus numériques qui jalonnent l’activité d’une entreprise. On peut schématiser les usages clés dans le cycle suivant, depuis l’analyse, la compréhension, la prédiction, la visualisation, la conception, l’aide à la décision opérationnelle et l’optimisation, l’automatisation voire l’apprentissage et l’entraînement.

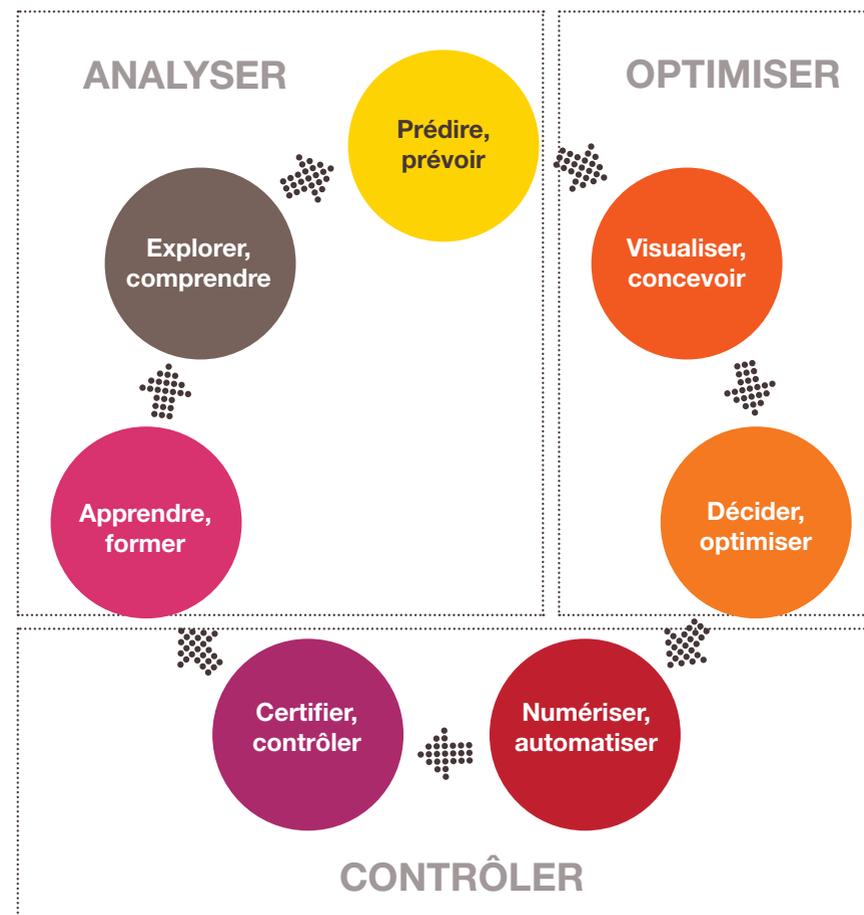


Figure 3 : Cycle des usages cardinaux de la modélisation (Aremus & Associés).

Ces technologies sous-tendent de nombreux univers à l'interface entre les mathématiques appliquées, les sciences informatiques et la formalisation quantitative de sciences. Historiquement les modèles à base d'équations aux dérivées partielles, d'analyse numérique et d'optimisation proche de la physique ont dominé l'utilisation initiale dans la conception et l'expérimentation virtuelle des grands systèmes industriels du 20^e siècle (énergie, transport...). Les autres types de modèles sont ceux de l'univers de « l'ingénierie système » intégrant également des concepts formels de logique et d'architecture (par exemple, le langage SysML - *Systems Modeling Language*) pour modéliser des systèmes d'une grande complexité, et du contrôle de la recherche opérationnelle et de l'optimisation stochastique. L'accélération de la production de données renforce rapidement l'intérêt pour les univers de l'apprentissage (*machine learning*) et les méthodes statistiques en grande dimension, des concepts centraux au *Big Data*.

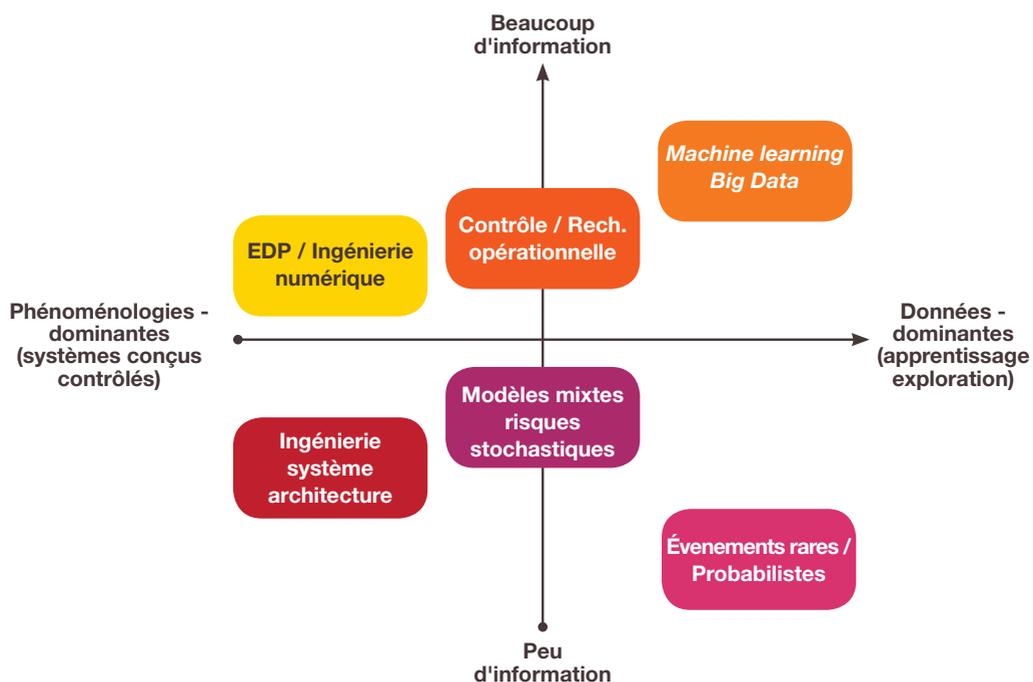


Figure 4 : Quelques univers de modélisation positionnés sur 2 axes importants, la richesse vs le type d'information disponible en calibration (Aremus & Associés).

1.3 Les modèles et algorithmes au cœur de la transition numérique, mais souvent enfouis et largement sous-exploités

Comme nous le verrons plus loin dans ce Livre Blanc, les modèles et algorithmes sont bien plus qu'une technologie historiquement développée depuis l'avènement de l'informatique : ils sont au cœur de la transition numérique. D'une part, la transition numérique s'accompagne d'une baisse massive de leur coût et de leur accessibilité (*cloud computing*, augmentation des puissances CPU, visualisation de données, stockage NoSQL,...), qu'il s'agisse du traitement de données ou du calcul, alors même que la puissance requise ne cesse d'augmenter (en volume, variété et vitesse des données, mais aussi en complexité des modèles et simulateurs).

Mais bien plus encore, ils sont enfouis au cœur stratégique des phénomènes de l'économie digitale et de l'émergence des nouveaux géants GAFA (Google, Amazon, Facebook, Apple) :

“ *il faut de l'apprentissage et des modèles statistiques de haut niveau pour traiter et monétiser le Big Data⁵, de la théorie des graphes pour tirer de la valeur des réseaux sociaux, des modèles numériques pour imprimer en 3D, des modèles géostatistiques ou séries temporelles pour tirer le plein parti des réseaux massifs d'objets connectés et de l'optimisation stochastique pour équilibrer les business models de l'économie collaborative...* ”

La modélisation ne paraissait pas « accessible » jusqu'à présent : l'algorithmique était uniquement l'affaire de la grande ingénierie industrielle (énergie, transport, télécom...), mais l'ère numérique que nous vivons produit une quantité toujours plus grande de données (*Big Data*) qu'il faut savoir analyser et traiter. Ceci donne une opportunité très intéressante. Le succès de Criteo dans le marché des données marketing en est l'illustration.

5. Le Livre Blanc de l'institut G9+ sur *Big Data*, l'accélérateur d'innovation consacre un chapitre entier sur « l'algorithme, chef d'orchestre de la révolution *Big Data* ».

De récentes études et enquêtes françaises⁶ et internationales⁷ suggèrent l'importance prise par les mathématiques appliquées dans l'économie de la connaissance, n'hésitant pas à imaginer une contribution à hauteur de près de 15 % du PIB et bien plus encore dans l'économie future. C'est une bonne nouvelle pour le potentiel de croissance et d'exportation associé, au vu des atouts stratégiques déterminants de l'école mathématique et informatique française.

Pourtant, il y a une grande méconnaissance de l'importance des modèles et algorithmes dans nombre d'études sur la transformation numérique où le sujet n'est jamais évoqué comme piste à part entière pour favoriser cette mutation nécessaire de nos entreprises (cf. Mc Kinsey et Roland Berger)⁸. Encore faut-il relever les défis du cloisonnement entre l'excellence scientifique et l'excellence entrepreneuriale⁹ ; et également savoir plus précisément de quels modèles on parle et quels sont les mécanismes clés de la création de valeur associée, d'où les enquêtes qui suivent.

6. Etude sur l'impact socio-économique des mathématiques EISEM – AMIES en partenariat avec la Fondation Sciences Mathématiques de Paris (FSMP), la Fondation Mathématique Jacques Hadamard (FMJH), et en association avec les Labex de mathématiques (2015).

7. Etude Deloitte UK / The Economic Benefits of Maths Science research (2012).

8. *Du rattrapage à la transformation : L'aventure numérique, une chance pour la France* (Une étude sur la maturité numérique des entreprises françaises effectuée par Roland Berger, 2014) et *Accélérer la mutation numérique des entreprises* (Rapport McKinsey, 2014).

9. Enquête « *Mathématiques et création d'entreprises* » CNRS / Aremus / Ministère Recherche, 2014.

“

Les modèles & algorithmes, après 4 000 ans déjà de contribution à l'innovation humaine, outillent désormais l'ensemble des processus de l'activité d'une entreprise. Systématisables et diffusables à très grand volume et bas coût, ils jouent un rôle fondamental et souvent méconnu au cœur de la transition digitale : sans eux, pas de Big Data, ni réseaux sociaux, ni objets connectés, ni économie collaborative... ni succès des GAFAs.

”

DES TECHNOLOGIES
 AU CŒUR DU FINANCEMENT
 PUBLIC DE LA R&D
**DANS DES SECTEURS
 HISTORIQUES LIMITÉS**

2.1 Domaines d'application historiques et tendances actuelles de marchés

De manière synoptique, les domaines traditionnels d'utilisation de la modélisation sont, d'une part, le remplacement des essais / maquetages physiques dans les grandes industries du 20^e siècle (défense, énergie, aéronautique, automobile...) et d'autre part, l'optimisation du fonctionnement des infrastructures et réseaux (télécom, énergie, transport) ainsi que des marchés financiers. Les tendances majeures actuelles du secteur marient l'extension des technologies historiques à d'autres secteurs économiques aux défis de sophistication toujours plus forte sur les infrastructures : complexité des systèmes à modéliser, prise en compte des aléas et incertitudes, accroissement du niveau d'interaction ou visualisation à haute performance (cf. figure 5).

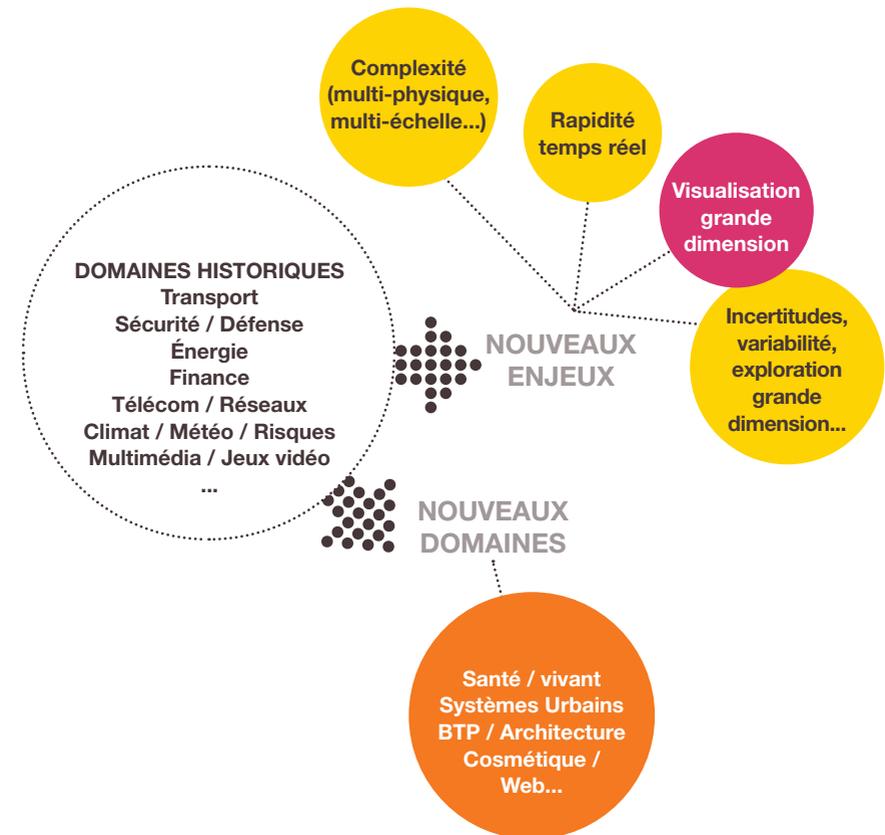


Figure 5 : Domaines d'application historiques des technologies et tendances récentes (source Aremus & Associés).

La modélisation est utilisée traditionnellement par une grande variété d'entreprises clientes (BtoB) :

- grands acteurs d'industries traditionnelles ou technologiques, ensembliers de simulation au sein de leurs fonctions d'ingénierie, production ou maintenance (grands groupes) ;
- chaînes de fournisseurs industriels (PME/ETI) invités à partager progressivement leurs processus PLM / conception / fabrication numérisés avec les grands acteurs ensembliers, et donc à intégrer plus massivement de la modélisation et simulation ;
- sociétés d'ingénierie/conseil en technologies et SSII, « outsourcing » les fonctions ingénierie des acteurs ci-dessus, et devenant progressivement des intermédiaires massifs, ainsi que leurs distributeurs.

De manière plus exploratoire, de nouveaux usages se développent :

- du côté des grands comptes, qu'il s'agisse de secteurs socio-économiques historiquement peu utilisateurs de simulation (cosmétique, grande distribution...) ou de départements support d'entreprises technologiques (notamment ventes, fonctions juridiques, voire RH...);
- du côté d'entreprises industrielles ou de services de la PME à l'ETI historiquement à l'écart de ces technologies, hors chaînes de fournisseurs des grands industriels ;
- et enfin, comme on le verra ci-dessous, du côté du flot massif de *start-up* et entreprises de croissance du digital.

Comme on le verra par la suite, les modèles et algorithmes étant de plus en plus enfouis, de manière générique, dans un très grand nombre de produits et services, il est délicat de donner des chiffres précis sur leur importance dans l'économie française ou mondiale. Voici quelques ordres de grandeur sur une fourchette approximative qu'il faudrait approfondir par des études complémentaires :

- au sens très étroit, l'édition de logiciels à base de technologies de modélisation peut probablement représenter un marché français d'environ 1 milliard d'euros (soit 0,05 % du PIB) c'est à dire 5-10 % du marché logiciel, ce qui est d'ailleurs l'ordre de grandeur estimé par Xerfi (2012) pour le marché du calcul à haute performance (mais intégrant une part en construction *hard* de machines HPC). Ceci sous-estime très largement l'importance du marché car une grande partie n'est pas commercialisée sous forme de licences de logiciels mais à l'intérieur des produits et de l'ingénierie elle-même ;
- au sens très large, l'étude EISEM parle de 15 % du PIB français (soit environ 300 milliards d'euros) pour l'impact des mathématiques, mais ceci dépasse très probablement l'incidence des modèles et algorithmes, d'autant que le numérique lui-même a pu être globalement évalué à « seulement » 5 % du PIB français (soit environ 100 milliards d'euros) selon l'étude **Bpifrance Le lab** « Le numérique déroutant » citant des chiffres McKinsey.

2.2 Briques et solutions – structuration de l'offre et acteurs existants

Ces marchés BtoB mobilisent une chaîne de valeur, depuis les briques fondamentales jusqu'aux solutions métiers ou SI intégrés chez le client BtoB, comprenant principalement les acteurs suivants.

Citons tout d'abord l'offre d'édition logicielle (*techno-providers / soft*) :

- éditeurs « fonctionnels » : logiciels, progiciels ou applications fournissant des solutions fonctionnelles intégrées / métiers aux utilisateurs finaux (exemples en CFAO : 3DS, Autodesk..., en recherche opérationnelle et optimisation logistique : Eurodécision...);
- éditeurs « scientifiques » :
 - 1 plateformes algorithmiques élémentaires de nature généraliste : boîte mathématique appliquée ou d'analyse de données, permettant à l'utilisateur de construire ses propres modèles (exemples : MathWorks, Maple, R, SAS, Modelica, Scilab...);
 - 2 briques disciplinaires spécialisées intégrant des codes déjà hautement sophistiqués et prêts à l'usage, par exemple des codes de mécanique, d'électromagnétisme, de biologie (exemples : Ansys, Comsol ou softs d'ESI...);
 - 3 briques algorithmiques en support à la modélisation et la simulation par exemple, maillage, parallélisation (exemples : Distene, Silkan...).

Ainsi qu'une offre en support :

- producteurs de matériels : Constructeurs PC ou HPC, voire de calcul embarqué (exemples : IBM, HP, Cray, SGI, Bull, Nvidia...) mais aussi de dispositifs de visualisation / d'interaction (murs d'écrans, réalité virtuelle et caves, etc.) ;
- fournisseurs de service d'hébergement ou de calcul distant en mode *cloud*, y compris pour le calcul HPC (exemples : Amazon, OVH...);
- intégrateurs, service et conseil en technologie, ingénierie et bureaux d'étude, associant logiciels, études et services de calcul dans des solutions métiers ou prestations aux directions de systèmes d'information (Altran, CapGemini, Logica...).

L'*open source* est devenu depuis les années 2000 un modèle essentiel dans l'amont de la filière ; dans le monde de l'analyse de données, *R statistical software*, par exemple, est à la base d'un grand nombre d'outils du *Big Data*, tandis que des alternatives comme Scilab, Octave etc., défient les plateformes mathématiques généralistes comme Matlab.

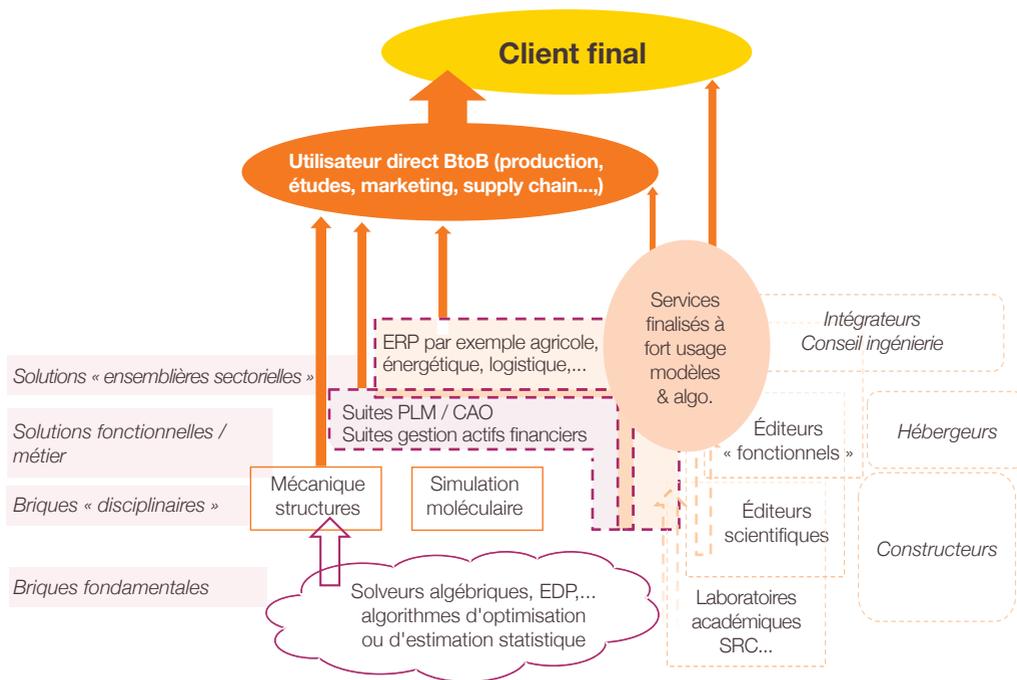


Figure 6 : Une schématisation de la chaîne de valeur des briques élémentaires aux clients finaux BtoC.

Cette répartition en briques de rangs différents dans la chaîne de valeur (cf. figure 6) est probablement de moins en moins pertinente face à divers mouvements d'intégration non seulement horizontale (par exemple des codes de simulation multi-physique, multisectorielle...) mais également verticale : notons les éditeurs de «boîtes à outils» généralistes intégrant des bibliothèques d'applications disciplinaires spécialisées, voire construisant des applications client finalisées ; les constructeurs développant des offres d'accès *cloud* ; ou encore les intégrateurs et ingénieurs développant des offres de conseil outillées en mode SaaS (« *Software-as-a-Service* ») comportant des modules de simulation sur-mesure, etc.

De fait, le secteur est grandement impacté par l'avènement du *cloud computing* - s'appuyant sur des puissances de calcul distantes et potentiellement mutualisées et consommées à l'usage - et de la distribution en mode SaaS, qui remplace le modèle traditionnel d'achat de licence en abonnement récurrent. Ce basculement de modèle économique ouvre potentiellement la voie à une démocratisation bien plus large des modèles et algorithmes, en fractionnant à l'usage le coût logiciel et mutualisant en économie collaborative le coût matériel des serveurs.

2.3 Notre enquête exploratoire sur 10 ans de financement public français (FUI, les aides à l'innovation de Bpifrance, ou création d'entreprises...)

Forts de ces intuitions, nous avons décidé d'analyser le *thésaurus* massif des données de financement public.

En rassemblant l'ensemble des projets financés de RDI, ce ne sont pas moins de 15 000 entreprises aidées sur la décennie, et de nombreux laboratoires et centres académiques. Quelle part représente les technologies de modélisation ? Dans quelles finalités, quels secteurs, quels cas d'usage ?

Voici ci-après les premiers résultats d'une enquête pilote sur le financement public de la modélisation.

2.3.1 Un poids décisif dans le financement public français

Nous avons caractérisé l'univers de la modélisation, simulation et optimisation à partir d'un environnement sémantique. L'analyse préalable des bases de données en démontre le **poids considérable** dans le financement public français. De manière approximative le total représente probablement plus de 0,5 milliard d'euros sur 10 ans¹⁰, avec une importance de manière décroissante de l'amont (FUI) à l'aval, proche du marché (Concours i-Lab / ex-Créadev). En ordre de grandeur, la modélisation est probablement impliquée dans près de 40 % des dossiers amont de type R&D et encore 10-15 % des dossiers d'aide à l'innovation ou à l'entrepreneuriat massif ! (cf. figure 7).

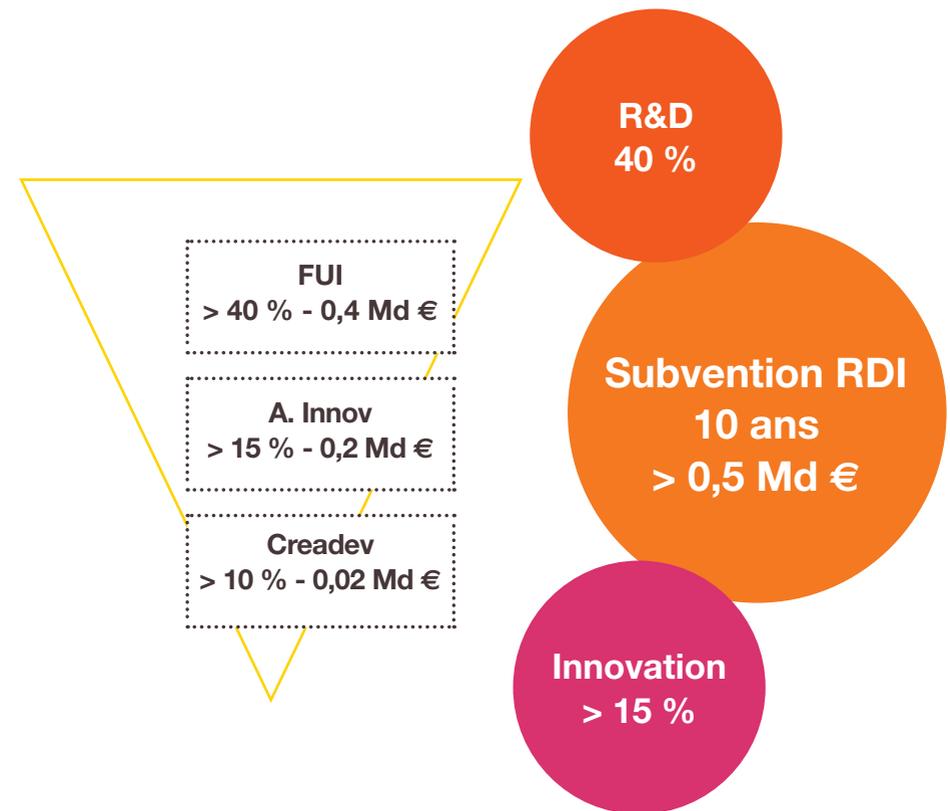


Figure 7 : Première analyse de données des bases de financement R&D françaises.

10. Et ceci ne prend pas en compte le financement de la recherche scientifique (ANR, grands instituts, projets européens de type programme-cadre...).

2.3.2 Un financement sectoriel laissant encore de vastes secteurs de l'économie à explorer

Tout ceci recouvre un vaste domaine socio-économique, que l'on peut très schématiquement segmenter en 3 grands univers sémantiques :

- IT (y compris web, télécom, média, R&D interne aux éditeurs de logiciels...);
- Santé/biotech (y compris cosmétique, alimentation...);
- Industrie technologique/énergie/cleantech.

Pour autant, vers quels secteurs le financement est-il orienté ? Si l'on met à part le domaine « technologies, IT, web... » qui recouvre une grande hétérogénéité sémantique, et en bonne partie les *techno-providers* plutôt que les utilisateurs finaux, on constate que 80 % du financement public de la modélisation est dirigé vers les domaines historiques (industrie, transport, défense, biotech...) n'irrigant probablement seulement que 20 % de l'économie française (cf. ventilation Insee des valeurs ajoutées sectorielles).

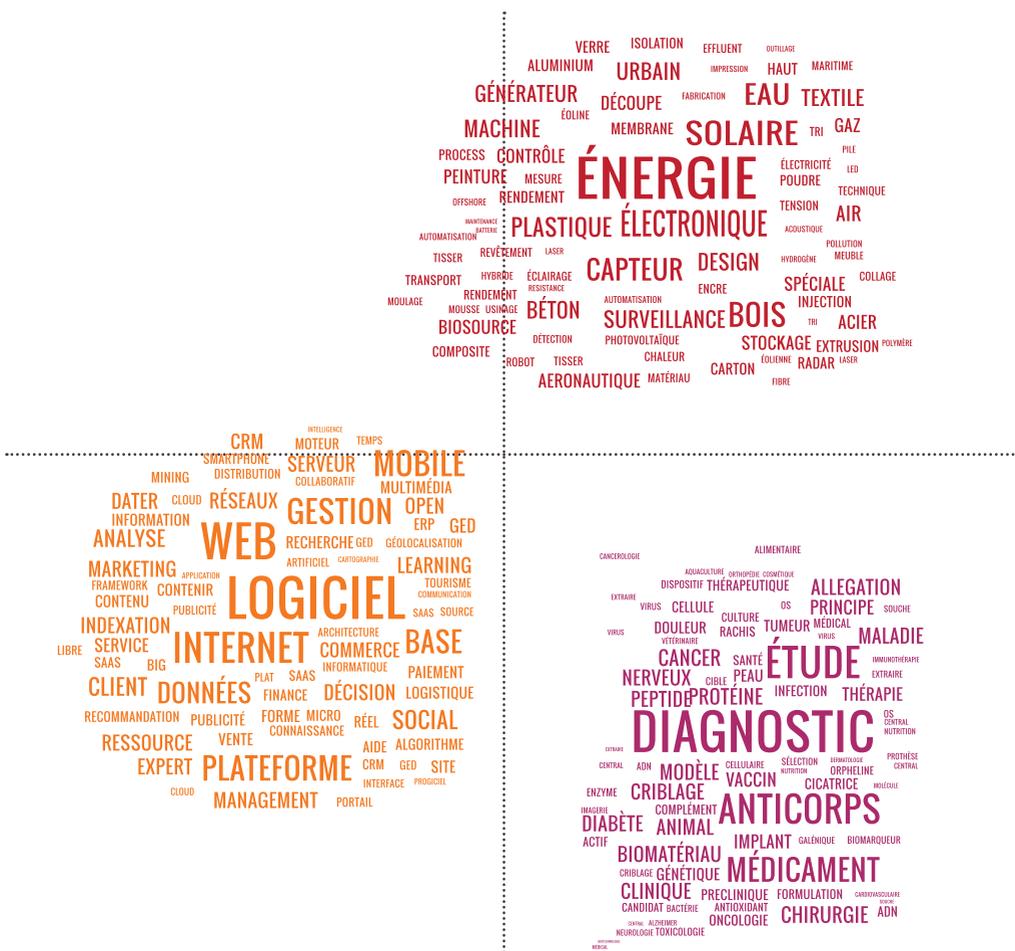


Figure 8 : Carte de mots qui prévalent dans les échantillons de projets contenant significativement de la modélisation (données de projets FUI sur 10 ans).

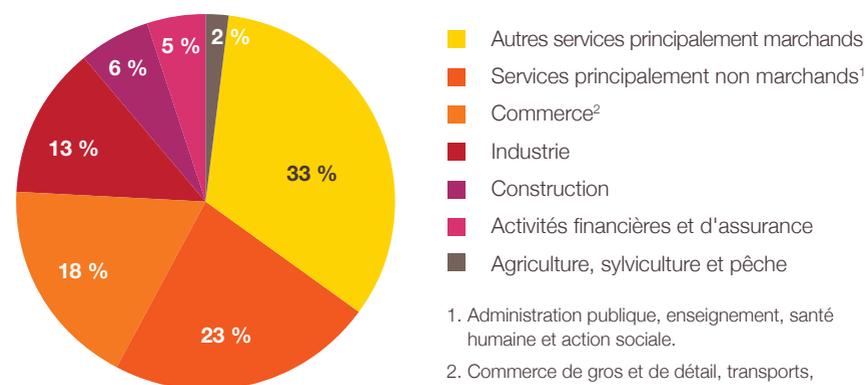
PROJETS FUI

- 65 % Technologies (IT, web, électronique, biotech, robotique...)
- 37 % Transports (hors automobiles)
- 30 % Énergie / extraction
- 29 % Sécurité / défense
- 22 % Santé, sanitaire & social
- 15 % Automobile
- 12 % Finance
- 12 % Services aux collectivités (déchets, eau, service urbain)

PROJETS AI

- 26 % Technologies (IT, web, électronique, biotech, robotique...)
- 17 % Conseil & services aux entreprises
- 9 % Médias / entertainment multimédias
- 7 % Santé, sanitaire & social
- 6 % Sécurité / défense
- 5 % Transports (hors automobiles)
- 5 % Énergie / extraction
- 4 % Industrie mécanique

VALEUR AJOUTÉE BRUTE PAR BRANCHE À PRIX COURANTS (EN 2012)



1. Administration publique, enseignement, santé humaine et action sociale.
2. Commerce de gros et de détail, transports, hébergement et restauration.

Figure 9 : (haut) : taux des projets d'un secteur donné contenant significativement de la modélisation (bases FUI et Bpifrance / AI) – (bas) : valeur ajoutée sectorielle du PIB français (Insee, 2012).

2.4 Une clé d'analyse : le domaine de création de valeur

Une autre clé essentielle d'analyse concerne les fonctions impactées chez les entreprises utilisatrices de modèles et algorithmes : se sert-on de modèles pour analyser les ventes, concevoir de nouveaux produits ou de nouveaux business, ou pour optimiser les opérations ?

Les modèles et algorithmes servent d'abord à analyser, comprendre et par là même à concevoir des produits et services mais aussi à décider, choisir et optimiser de manière opérationnelle les processus de l'entreprise, et enfin à garantir ou certifier ceux-ci vis-à-vis de tiers.

Le tableau ci-dessous montre que ces différents usages trouvent leurs applications dans les fonctions complémentaires qui structurent l'organisation de l'entreprise, et donc des clients différents :

- directeur marketing & commercial ;
- directeur technique, R&D ou ingénierie ;
- directeur de production ou opérations, directeur des systèmes d'information ;
- directeur administratif et financier RH, directeur des risques, de la conformité, etc.

Autant de domaines de création de valeur possibles, dont la mise en œuvre implique des processus et des gains de nature différente pour l'entreprise :

- gains de productivité par optimisation des coûts (sur les opérations, les fonctions support, voire les fonctions de conception) ;
- croissance du chiffre d'affaires ou des marges associées (sur les ventes et les nouveaux produits / l'innovation) ;
- gains liés à la maîtrise des risques (conformité, couvertures des risques, RSE, agréments voire maîtrise de l'image).

“ Les managers ont besoin de méthodes claires pour utiliser quotidiennement les nouveaux modèles et algorithmes. Par nécessité, il faut désormais des teraoctets de données et de la modélisation sophistiquée pour affûter le marketing, la gestion de risques et la production. ”

(D. Barton & D. Court, McKinsey, Harvard Business Review 2012)

	Ventes	Nouveaux Business Innovation	Opérations	Fonctions support	Risques contrôle Certification réglementation
Analyser Comprendre Concevoir	●	●	●	●	
Décider Optimiser	●	●	●	●	
Garantir Certifier			●	●	●

Qu'en est-il de leur importance relative pour les entreprises dans les usages actuels ?

Le graphique ci-dessous présente les mots-clés majoritaires suivant que l'on parle :

- 1 de financement public (à gauche – où le support aux fonctions R&D innovation domine) ;
- 2 ou du résultat des enquêtes quantitatives menées dans le cadre du Livre Blanc, (au centre – où l'optimisation des fonctions support ou des opérations apparaît comme un besoin peu satisfait) ;
- 3 ou des interviews qualitatives (à droite – où les thématiques de contrôle des risques ou d'optimisation des ventes nous ont été fréquemment citées).

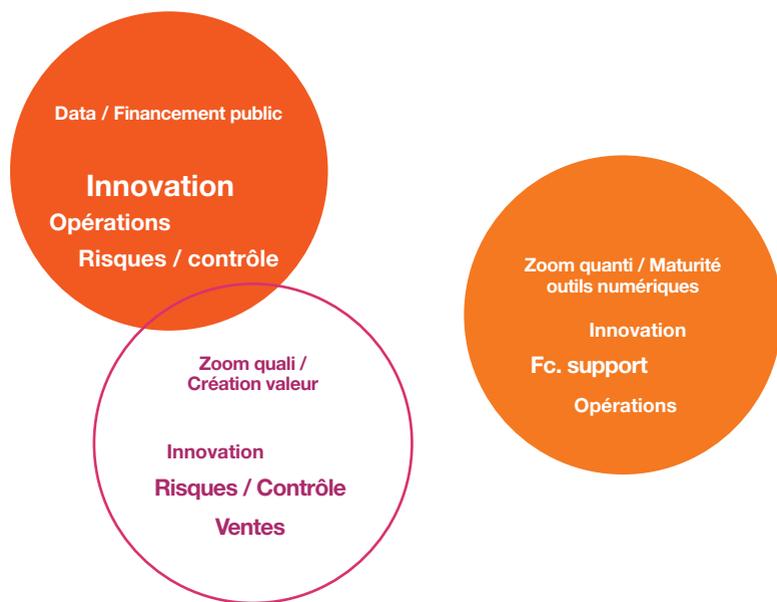


Figure 10 : Domaines de création de valeur dominants dans les projets MSO (analyse base FUI / Bpifrance).

Comme le note l'étude Xerfi, pour les acteurs historiques souvent industriels, la création de valeur se situe fortement du côté des « (...) gains de productivité (...) induits par l'utilisation de la simulation numérique dans les phases de conception de nouveaux produits et services (...) ».

Pourtant celle-ci peut, désormais, aller bien au-delà en gain de productivité généralisée en s'étendant au-delà des fonctions technologiques, sur les opérations et fonctions support, et bien plus encore en créant de véritables ruptures stratégiques et commerciales sur la proposition de valeur et la relation client.

Comme le montrent les géants du numérique,

“ *l'algorithmique est un support décisif à une connaissance plus intime du client, un avantage décisif pour pérenniser et croître. De plus en plus, le marketing devient modélisable et testable en temps réel : l'intérêt est, non seulement, d'optimiser les ventes mais plus profondément encore d'entrer dans une transformation de l'expérience client sur des produits et services qui peuvent désormais bénéficier d'une évolution constante.* ”

“

Les technologies de modélisation ont occupé une place massive dans le financement public de la R&D et de l'innovation. Pourtant, l'analyse montre que les domaines d'application historiques se sont limités à une faible part de l'économie française ; ils se concentrent également sur les fonctions technologiques ou de conception de ces entreprises, alors que la modélisation crée de la valeur bien au-delà, notamment sur le marketing, les ventes ou la supply chain.

”

ET LES PME DANS TOUT ÇA ?

LES ENSEIGNEMENTS DES EXPÉRIMENTATIONS ET DES ENQUÊTES RÉCENTES

On peut répartir les entreprises françaises en 4 groupes approximativement équivalents en termes de population employée (2-3 millions de salariés dans chacun) :

- 1 les micro-entreprises et TPE (< 10 personnes) ;
- 2 les PME définies au niveau européen à moins de 249 salariés et/ou selon critères financiers) ;
- 3 les ETI (définies au niveau européen entre 250-5 000 salariés et/ou selon critères financiers) ;
- 4 les grands groupes.

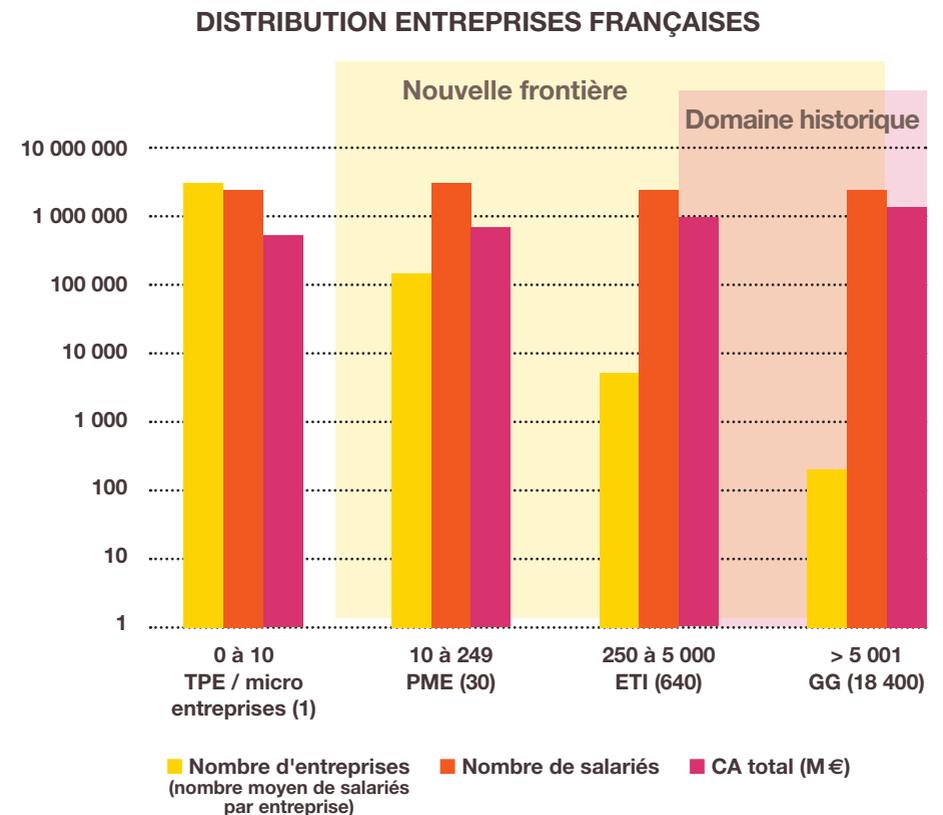


Figure 11 : Démographie des entreprises françaises (source Insee retraitée sur échelle logarithmique) et domaines d'application de la modélisation.

Les technologies de modélisation historiquement financées par les ressources publiques concernaient essentiellement de grandes entreprises ainsi que des PME éditeurs de logiciels ou technologiques. Ce qui représente probablement d'ores et déjà un panel de 15 000 entreprises touchées par l'ensemble des financements. Mais la « nouvelle frontière » représente plus de 100 000 entreprises en incluant également des PME-ETI non technologiques, mais aussi les fonctions « non techniques » de grandes entreprises.

Le constat de l'insuffisante valorisation des technologies de modélisation par les PME a conduit dès fin 2010 plusieurs acteurs publics à lancer : d'une part l'initiative HPC (High Performance Computing)-PME, dont on trouvera ci-après (§3.1) un retour d'expérience conduit par GENCI, avec d'ores et déjà, des impacts sur une cinquantaine de PME principalement technologiques ; d'autre part, l'appel à projets d'AMIES auprès de quelques dizaines d'entreprises (§3.2).

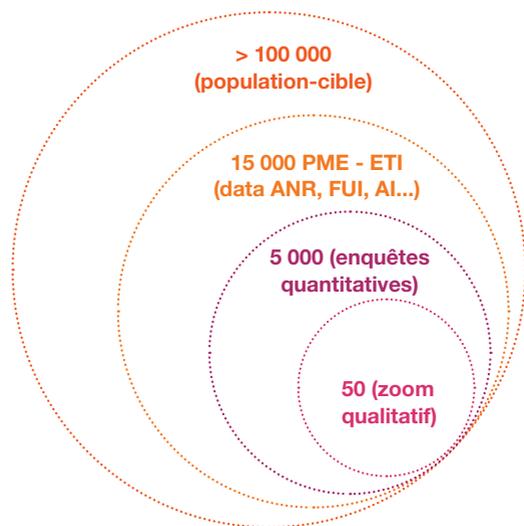


Figure 12 : population cible en nombre d'entreprises et échantillonnage des enquêtes du Livre Blanc.

Suivront les bilans de deux enquêtes pionnières : la première, de nature quantitative, a sondé grâce à la base de données **Bpifrance** un panel de 5 000 entreprises PME-ETI ; la seconde, de nature qualitative, comportait des interviews plus fouillées menés par **Aremus & Associés** sur une cinquantaine d'entreprises.

3.1 Une initiative pionnière : retour d'expérience du programme HPC-PME GENCI (depuis fin 2010)

L'initiative HPC-PME visait à aider les PME à évaluer concrètement les gains de productivité et de compétitivité qu'elles obtiendraient en intégrant dans leurs processus industriels, pour la première fois ou davantage, le recours à des moyens de calcul couplés à des logiciels de modélisation / simulation.

L'initiative a permis ainsi aux quelques dizaines de PME accompagnées de diminuer les risques liés à la prise en main et à l'utilisation de cette technologie, qu'elle soit nouvelle pour ces PME ou qu'elle soit utilisée dans des conditions plus optimales.

Pour cela, les entreprises ont bénéficié d'un accompagnement personnalisé alliant conseil, formation et expertise, accès à des ressources de calcul si nécessaire et, dans certains cas, co-développement avec un laboratoire de recherche. Cela leur permettait de réaliser de façon concrète, sur une période de 6 mois à 1 an, une démonstration de faisabilité d'un projet industriel tirant partie de l'utilisation de la simulation numérique et parfois du calcul intensif. Il s'agissait dans cette démarche de PME technologiques, mais non nécessairement expertes en calcul.

De plus, 6 PME ont également sollicité l'initiative pour des besoins hors périmètre d'HPC-PME : R&D trop amont ou PME déjà sensibilisées, souhaitant trouver des moyens de calcul pour des activités d'études en complément de ses moyens internes, et mises en contact, dans ce cas avec d'autres acteurs de l'écosystème.

De par le lien entre GENCI et l'infrastructure de recherche européenne PRACE¹¹, des PME françaises ont pu renforcer leur visibilité à l'international et particulièrement en Europe.

C'est le cas, par exemple, de la PME nantaise HydrOcean, spécialisée dans la modélisation hydrodynamique dans le domaine naval, maritime et les énergies marines, qui a reçu une allocation de plus de 13 millions d'heures sur les supercalculateurs de PRACE. Cette allocation a été utilisée pour des travaux autour de la résistance de bateaux soumis à des vagues extrêmes ou de la modélisation de l'aquaplaning pour Michelin. Cette PME s'est ainsi rendue visible auprès des 25 pays partenaires de PRACE en Europe, et notamment sur le marché allemand avec à la clé un contrat signé récemment avec Volkswagen.

Les exemples suivants illustrent des résultats obtenus par des PME accompagnées par HPC-PME depuis 3 ans et issues de domaines industriels variés :

- Dans le domaine de la mécanique des fluides appliquée à l'aéronautique et l'automobile : le motoriste nivernais **Danielson Engineering** s'est équipé d'une plateforme matérielle et logicielle pour faire du calcul 3D avancé et proposer de nouvelles prestations avancées de modélisation, de combustion et d'optimisation à ses clients (4 recrutements suite au projet).

- Dans le domaine de la santé, **Protomed**, PME marseillaise, spécialisée dans l'ingénierie médicale, a disposé de 20 000 heures de calcul sur la machine Jade de GENCI au CINES. Cela lui a permis de valider, en collaboration avec l'éditeur de logiciels Altair Engineering, le passage à l'échelle de ses méthodologies de modélisation ainsi que de valider et certifier de nouveaux modèles d'implants intra-artériels. La PME a augmenté son chiffre d'affaires de 20 % et a été lauréate de l'appel d'offres d'un grand donneur d'ordre médical allemand.
- Dans le domaine des énergies marines renouvelables, outre **HydrOcean**, entreprise nantaise déjà citée, **OpenOcean**, société d'expertise dans le domaine des énergies marines renouvelables, basée à Paris, a bénéficié de HPC-PME pour s'insérer dans l'écosystème français du calcul intensif. Elle développera avec l'aide d'un financement européen, une plateforme de services *Cloud* pour l'optimisation d'implantation de parcs éoliens pour ses clients.
- Enfin, dans les domaines de l'électronique et de l'électromagnétisme, la société **Aselta**, basée à Grenoble et spécialisée dans la microélectronique, a bénéficié, grâce à HPC-PME, de l'expertise du laboratoire d'informatique (LIG) de l'Université Joseph Fourier de Grenoble afin d'optimiser son logiciel de lithographie électronique et d'améliorer la résolution et la précision de gravure lors de la conception de circuits intégrés.
- **Nexio Simulation**, PME toulousaine spécialisée dans les études électromagnétiques pour le naval, l'aéronautique ou l'automobile, a travaillé avec les chercheurs du laboratoire IRIT du CNRS et a réalisé 30 000 heures de calcul au mésocentre CALMIP à Toulouse afin de porter son logiciel vers le calcul intensif. Ces travaux menés dans le cadre de HPC-PME lui ont permis de remporter 2 contrats majeurs au Japon et de travailler avec des grands donneurs d'ordre tels qu'IBM ou Fujitsu.

11. PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe*) est une infrastructure européenne de recherche composée de 25 pays dont la France, représentée par GENCI. À travers l'engagement de 4 pays (Allemagne, Espagne, France, Italie), PRACE met à disposition des scientifiques et industriels européens, un réseau de 6 supercalculateurs d'architectures complémentaires, représentant une capacité cumulée de 15 Pflop/s (ou un million de milliards d'opérations à virgule flottante par seconde), dont 2 Pflop/s pour la France avec la machine Curie, installée au TGCC (Très Grand Centre de Calcul du CEA).

3.1.2 Retour d'expériences

Le point fort de l'initiative réside dans l'expertise apportée aux entreprises par le réseau de partenaires de HPC-PME. Basé sur la forte motivation et l'engagement de ses membres (centres de calcul nationaux et régionaux, instituts de recherche, écoles d'ingénieurs...), ce réseau, aux compétences complémentaires et à forte composante régionale, permet aux entreprises de bénéficier d'un accompagnement de proximité adapté à leurs besoins. Ainsi les partenariats mis en place avec les centres de calcul universitaires de l'Equipex Equip@meso¹² ou encore l'intervention de chercheurs et d'experts¹³ auprès des entreprises, ont permis de développer des liens forts entre le monde académique et industriel, et d'obtenir de nombreux résultats concrets et visibles.

Ces actions ont été rendues possibles grâce à la souplesse du dispositif mis en place qui, au retour de l'expérience des trois premières années de l'initiative, est un facteur important de motivation et d'implication des partenaires en région. En effet, l'initiative HPC-PME est organisée autour d'une structure légère et agile, basée au niveau national des comités représentant **Bpifrance**, GENCI et Inria. Elle est organisée au niveau régional, sur le réseau des partenaires adhérents de l'initiative qui relaient l'initiative au niveau local et travaillent en proximité avec les PME rapprochées en cellules pilotes à Grenoble, Lyon, Reims ou encore Toulouse. Ceci, dans le but de favoriser le retour d'expérience entre acteurs locaux, de coordonner localement les actions vers les entreprises et donc d'accroître la réactivité des réponses apportées aux PME.

Après 5 ans et plus d'une cinquantaine de PME accompagnées, démonstration a été faite de l'intérêt de l'Initiative HPC-PME, au point de convaincre l'État d'investir dans cette démarche pour la démultiplier en région au plus près des PME.

La mise en œuvre de cette action a été confiée à GENCI et Teratec. Dans le cadre de leur réponse commune en juin 2014 à l'Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI) « Diffusion de la simulation numérique » PIA (Programme d'investissements d'avenir), GENCI et Teratec mettront à disposition des PME françaises une offre globale, nationale et régionale, avec des solutions sur-mesures et sur étagère. Ce projet inclut la démultiplication en région de l'Initiative HPC-PME, à travers le déploiement de plateformes régionales d'accompagnement. Son lancement est prévu dans le courant du 2^e semestre 2015.

12. Plus de 20 PME suivies à Bordeaux, Grenoble, Lyon, Marseille, Paris, Reims, Rouen et Toulouse.

13. Issus, entre autres, de BNP Paribas, du CNRS, du CEA, de l'École des Ponts ParisTech, de l'ENSEEIH, d'IFPEN, d'Inria, du LIG (Grenoble), de l'ONERA, de l'UPMC ou encore de l'Université Nice-Sophia-Antipolis.

3.2 Un appel à projet permanent proposé par AMIES

Créée au moment du programme d'investissement d'avenir PIA1, l'Agence Maths-Entreprises, AMIES, LabEx piloté par le CNRS, en partenariat avec l'Université de Grenoble et INRIA, conduit 2 missions principales :

- proposer et soutenir des programmes, en formation et recherche, visant à une meilleure interaction des mathématiciens avec les entreprises ;
- offrir aux entreprises, aux chercheurs et aux étudiants une visibilité des opportunités qui existent dans ce domaine.

Dans ce cadre, AMIES encourage les entreprises à présenter des sujets d'étude auxquels les mathématiques tenteront d'apporter des réponses et les assiste dans la démarche. Ceci permet de mieux appréhender quantitativement et qualitativement les problématiques industrielles émergentes et d'en déduire les expertises mathématiques à mobiliser, dès aujourd'hui, pour contribuer aux innovations de demain.

Afin d'aborder les différentes configurations d'intervention satisfaisant aux contraintes de R&D des entreprises, les formats de projets mathématiciens-entreprises possibles sont multiples : d'une simple question de pertinence, qui dure quelques minutes, à un sujet de thèse qui dure 3 ans, une collaboration ou un recrutement qui dure plus longtemps encore :

- un facilitateur AMIES formalisera, en termes mathématiques, une problématique industrielle. Il guidera ensuite le demandeur pour, soit utiliser des outils mathématiques déjà connus, soit l'orienter vers des équipes de recherche afin de développer une solution innovante répondant à son problème ;
- des journées de rencontres Maths-Industrie permettent d'exposer un problème devant un panel de chercheurs et de doctorants, en vue d'obtenir des conseils en direct ;

- des Semaines d'Etude Maths-Entreprise (**SEME**) offrent une formule de réflexion plus longue à des groupes de doctorants qui s'attachent à un problème, une semaine durant, pour en faire une restitution le 5^e jour devant les industriels ;
- des Projets Exploratoires (**PEPS**) qui financent des pré-études sur un sujet bien défini. La mission ainsi couverte par un laboratoire de mathématiques va du conseil scientifique, à la mise en place d'un stage, d'une thèse, ou d'un partenariat spécifique.

Toutes ces actions mobilisent à la fois des chercheurs, des chefs d'entreprise ou responsables de R&D, et des doctorants, voire des étudiants de Master. En encourageant et en suivant ces différents projets, il devient ainsi possible d'identifier les domaines scientifiques générant un impact économique au sein de l'entreprise, impact au présent ou dans un avenir proche. Cela provoque également un regard différent de tous ces acteurs sur le rôle que peuvent jouer certaines mathématiques, dont en particulier la modélisation.

Ainsi à mi-2015, et depuis sa création, AMIES a participé au financement de 39 PEPS, et leur nombre, chaque année, est en constante augmentation. La qualité scientifique y est exigée, ainsi que l'implication effective de l'entreprise et l'évaluation de l'impact économique pour cette dernière. Nous sommes ainsi en mesure d'observer en direct les compétences mathématiques permettant de répondre aux attentes d'innovation et de compétitivité des entreprises. Les SEME font le tour des universités de France et 13 d'entre elles ont été organisées de 2011 à mi-2015, avec une cadence moyenne d'une par trimestre universitaire.

Avant de revenir sur le retour d'expérience dans ces projets soutenus par AMIES, il est intéressant de situer une échelle de comparaison de technologies et champs de compétence mathématique en général. À ce titre, nous devons citer l'étude récente commanditée par AMIES, en partenariat avec la Fondation Sciences Mathématiques de Paris (FSMP) et la Fondation Mathématique Jacques Hadamard (FMJH), et en association avec les LabEx de mathématiques. Cette étude a été réalisée en toute indépendance, suite à un appel d'offre public, par le cabinet de conseil en stratégie CMI. Elle a été rendue publique le 27 mai 2015.

Au cœur de son analyse, ce rapport souligne le rôle essentiel des mathématiques dans le développement des entreprises, appelé à se renforcer *via* la maîtrise par les entreprises de tout ou partie de 5 champs de compétences stratégiques embarquant des mathématiques fondamentales et appliquées (liste sans valeur hiérarchique) :

- **Traitement du signal et analyse d'images** ;
- **Data Mining** (statistiques, analyse de données et apprentissage) ;
- **MSO** (Modélisation - Simulation - Optimisation) ;
- **HPC** (« *High Performance Computing* » ou calcul haute performance) ;
- **Sécurité des systèmes d'information et Cryptographie.**

Notons que le terme MSO, au sens de la classification adoptée par CMI, est beaucoup plus ciblé que le spectre couvert par les modèles et algorithmes cités tout au long des autres chapitres du présent Livre Blanc. Il englobe également les catégories employées par CMI pour le *Data Mining*, le HPC ainsi que les contributions algorithmiques au traitement du signal et à l'analyse d'images.

La maîtrise de ces champs de compétences, par les entreprises, est vue comme essentielle pour leur permettre de relever les défis industriels actuels et futurs, spécifiques ou non à leur secteur d'activité, et rester compétitives, comme en atteste le retour d'expérience apporté par les PEPS (39 PEPS expertisés et soumis depuis la création d'AMIES en 2011) et les SEME (57 sujets proposés par 48 entreprises différentes lors des 13 SEME depuis 2011).

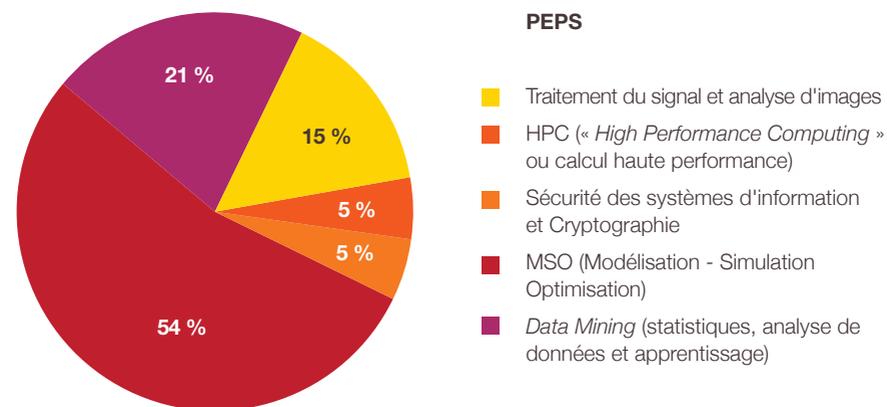


Figure 15 : Ventilation par type de domaines d'expertise dans les PEPS (Projets AMIES) sur 39 projets concernant des PME dans 79 % des cas.

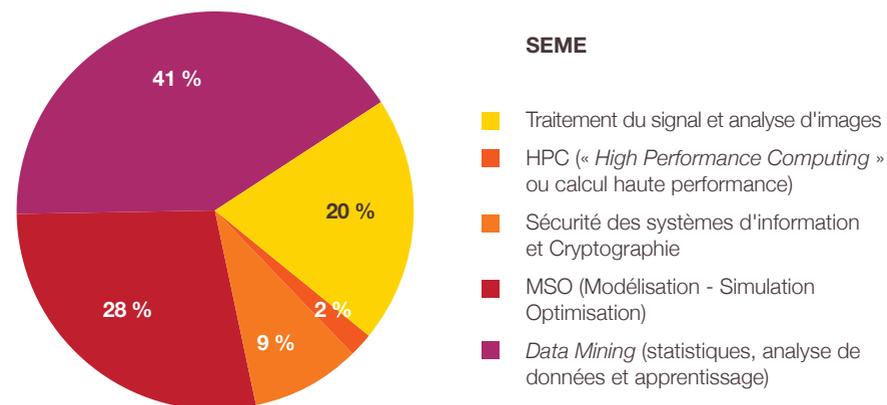


Figure 16 : Ventilation par type de domaines d'expertise dans les SEME (Semaines d'Études AMIES) sur 56 projets, concernant des PME dans 37 % des cas.

En considérant que les PEPS reflètent essentiellement des préoccupations de développement et de production au sein des entreprises, nous pouvons déduire que la modélisation est bien assimilée en tant que ressource par les industriels, mais que les besoins restent grands en compétences externes. Quant aux SEME, qui par nature dévoilent des sujets plus « amont » que les PEPS (et donc plus naturellement accessibles aux grands groupes), elles montrent clairement l'intérêt récent pour le *Big Data*, tout en insistant sur les aspects encore prospectifs de la MSO.

Au-delà des PEPS et des SEME, l'Agence AMIES est à l'initiative de dizaines d'autres collaborations, pour lesquelles ce type d'analyse n'est pas applicable directement.

Pour rappel, la communauté académique a initié, dans cette perspective, la mise en place du Label C3I pour attester de la compétence en HPC de docteurs. Une centaine de docteurs a aujourd'hui obtenu ce label. Le principe pourrait être étendu aux champs de la MSO, ou encore du *data analytics* ou *Big Data* dans le futur.

3.3 Une enquête à deux niveaux, réalisée auprès des TPE - PME

Au-delà, des freins restent à lever pour « passer à l'échelle » dans le rythme de développement des premières initiatives publiques. Forts de ces constats, nous avons décidé de regarder plus loin, nous avons lancé 2 niveaux d'enquête dédiée :

- une enquête quantitative auprès de 5 000 entreprises issues de la base de données de **Bpifrance** (ci-dessous) ;
- un zoom qualitatif auprès d'une cinquantaine d'entreprises de secteurs exploratoires (cf. le §3.4).

Sur un échantillon de 5 000 entreprises environ, sur la base d'une stratification des domaines socio-économiques, nous avons eu plus d'une centaine de réponses complètes sur le questionnaire (200 réponses au total). Bon nombre de secteurs nouveaux étaient représentés, et en vaste majorité sur des TPE-PME (de 1 à 250 personnes).

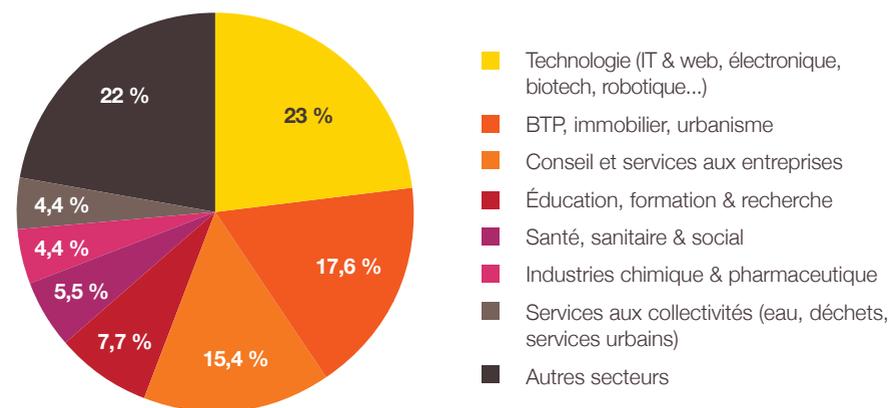


Figure 17 : Ventilation sectorielle des répondants à l'enquête Livre Blanc.

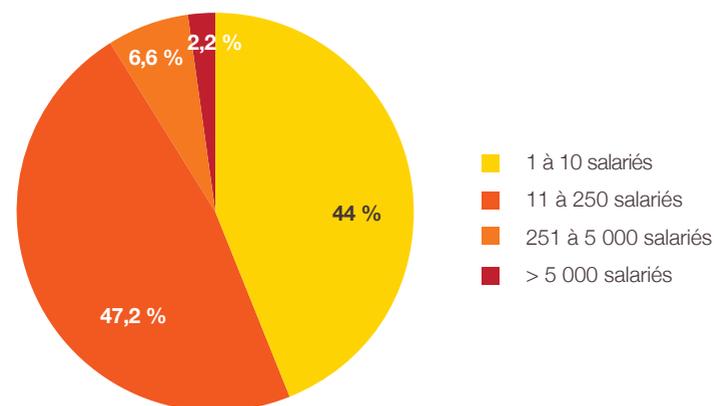


Figure 18 : Ventilation en taille d'entreprises des répondants à l'enquête Livre Blanc.

Plus spécifiquement, l'échantillon représentait :

- pour 1/3 des « *techno-providers* » ;
- une large majorité d'entreprises intéressées par les technologies de modélisation... bien que n'en utilisant pas encore pour 2/3 d'entre elles !

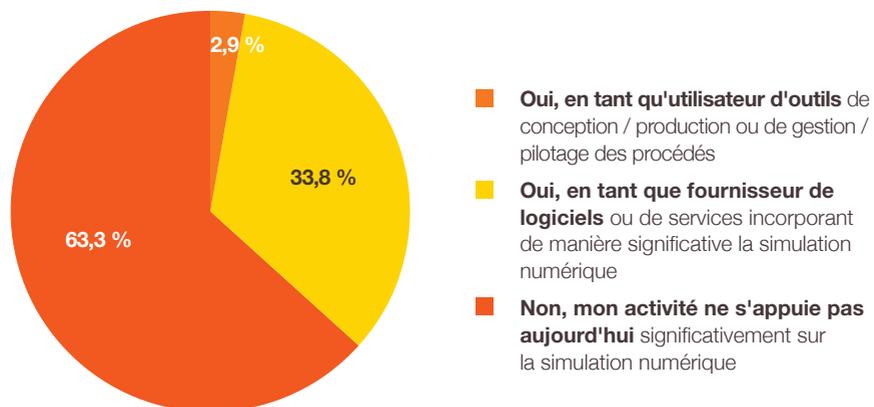


Figure 19 : Taux d'usage actuel de la modélisation des répondants à l'enquête Livre Blanc.

Il y a beaucoup à tirer de ces réponses représentant une très grande variété d'acteurs qui a permis, d'ores et déjà, de dépasser largement le premier cercle des « *techno-providers* » abordés par les premières initiatives publiques mentionnées ci-dessus (programme HPC-PME). Les premiers enseignements essentiels de cette enquête exploratoire sont les suivants :

- 1 de nombreuses entreprises (< 250 personnes) s'avèrent appétentes de la sensibilisation et de la formation pour mieux comprendre et tester la modélisation (pour les 2/3 d'entre elles...);
- 2 elles déclarent un intérêt marqué pour des partenariats technologiques, commerciaux et plus encore académiques en la matière (pour 60 à 80 % d'entre elles);
- 3 seulement un 1/3 d'entre eux en font déjà !
Nous avons donc décidé d'approfondir l'enquête avec des interviews qualitatives auprès d'un panel provenant des différents secteurs socio-économiques.

3.4 Nos enquêtes qualitatives : qu'en pensent les PME et que font-elles concrètement ?

3.4.1 Périmètre et maturités sectorielles

Nos enquêtes qualitatives ont cherché à sonder les entreprises sur 3 grands axes :

- **maturité** : le numérique, et les outils à base de modèles, cela vous parle-t-il ? En utilisez-vous déjà ?
- **comment** : sur quel type d'outil, quelles ressources internes / externes vous appuyez-vous pour cela ?
- **freins et opportunités** : quels sont des freins actuels et les opportunités pour développer l'usage de la modélisation ?

Ci-dessous un synoptique des secteurs interrogés dans l'enquête qualitative :

- agriculture - agroalimentaire ;
- électronique ;
- énergie ;
- transport automobile, maritime, logistique ;
- télécommunications ;
- e-commerce ;
- industrie transformation ;
- BTP, immobilier, mobilier ;
- assurance ;
- services aux entreprises ;
- média / *entertainment* / publicité ;
- services aux personnes.

Nous avons réalisé une trentaine d'interviews de PME, sur des secteurs volontairement variés, et les résultats montrent une situation assez contrastée.

Principaux points :

- pour la plupart des PME interrogées, les algorithmes mathématiques sont perçus comme permettant d'optimiser à la fois la **productivité de l'entreprise** et **l'expérience client** ;
- **les PME les plus « numériques » sont les plus sensibilisées** (e-commerce, publicité, médias, télécom). La plupart d'entre elles brassent déjà une quantité massive de données et leur utilisation dans le cadre d'algorithmes intelligents est une problématique qui s'impose naturellement ;
- sur les secteurs moins numériques (bâtiment, services, transport, industrie), la modélisation suscite de l'intérêt mais **n'est pas perçue comme stratégique**. Et certaines PME en profitent pour **innover et transformer radicalement la proposition de valeur client** (exemples : DesBrasEnPlus, CaptainContrat, SaveCode,...) ;
- le principal frein à la mise en place de ces technologies dans les PME est le **manque de compétence en interne**. Plusieurs PME parmi les plus « numériques » ont internalisé les compétences algorithmiques, les considérant comme *core-stratégique* pour **maintenir un avantage concurrentiel sur la durée**.

3.4.2 Bâtiment

L'industrie TP et BTP dispose d'une robuste informatique de gestion mais de peu d'outils pour gérer concrètement l'organisation des chantiers sur le terrain.

La modélisation est perçue comme utile pour optimiser l'organisation des chantiers, pour optimiser à la fois la productivité des acteurs et l'expérience du client promoteur. Un standard de modélisation semble s'imposer sur le marché : le BIM (*Building Information Model*). Cet outil de modélisation globale de chantier modifie considérablement l'expérience client puisqu'il permet la collaboration de tous les acteurs autour d'une même modélisation d'un chantier.

“ **Néanmoins, mettre en place un BIM reste extrêmement cher, ce qui freine sa généralisation. Par ailleurs, les données remontées par les engins de chantier sont nombreuses mais très techniques, et difficilement exploitables. Nous avons un problème d'expertise pour pouvoir créer de la valeur à partir de ces données.** ”

indique le responsable engins d'une PME du BTP.

Une seconde utilisation possible de la modélisation serait de prévoir les incidents de chantiers, qui ont des impacts majeurs sur la marge opérationnelle des entreprises.

“ **Parfois, un seul incident sur un gros chantier détruit la marge des 2 années précédentes.** ”

“ **Etre capable d'utiliser des modèles mathématiques pour prévoir et prévenir les gros incidents serait très intéressant.** ”

nous indique le responsable d'une PME intervenant sur de gros chantiers de TP.

3.4.3 Agriculture

L'agriculture est un secteur qui se numérise à grande vitesse *via* la mise en place d'objets connectés : capteurs dans les champs ou sur les camions de collecte, photos aériennes (drones), etc.

La modélisation mathématique est perçue comme pertinente pour optimiser la collecte logistique agricole.

“ La collecte de produits pondéreux est très couteuse et assez complexe. Nous avons une expertise très forte en interne mais peu d'outils pour nous aider à prendre les décisions. Or chaque pourcent gagné représente beaucoup d'argent, ”

nous indique le directeur d'une coopérative de produits agricoles pondéreux.

“ La diversité des références et leur affectation dans les usines de transformation est un problème complexe ”

précise le responsable opération d'une coopérative de fruits et légumes. La modélisation de l'affectation de ressources pourrait être d'une aide précieuse sur ces sujets.

Concernant l'optimisation de la production agricole, un modèle mathématique couplant des données climatiques et agronomiques pourrait permettre de prévoir de manière plus fine et plus précise les variations de qualité observées sur les récoltes.

“ Nous avons besoin de nouveaux modèles pour comprendre et prescrire les bons comportements auprès de nos exploitants ”

nous affirme le responsable agronomie d'une coopérative céréalière.

“ Si nous avons les compétences agronomiques en interne, il nous manque les compétences statistiques nécessaires pour les créer. ”

Des PME spécialisées dans les capteurs sur les champs intègrent désormais la compétence algorithmique au cœur de leur activité. C'est ce que réalise par exemple Force A, une société spécialisée dans les capteurs pour la vigne, et qui permet d'évaluer en amont la qualité du raisin grâce à des modèles agronomiques performants. Idem pour un leader de solutions de drones, qui fournit directement des recommandations de traitements phytosanitaires associées aux photos aériennes prises par les drones.

“ C'est cette expertise que nous vendons aux exploitants beaucoup plus que les photos elles-mêmes, ”

indique son dirigeant.

“ C'est une toute nouvelle approche de la supply chain agri-agro qui peut désormais émerger grâce aux données agricoles massives et aux meilleurs modèles mathématiques, pour produire mieux et de manière durable dans l'intérêt partagé des parties prenantes (coopératives, exploitants, négociants). ”

J. Wainstain, CEO de TheGreenData,

3.4.4 E-commerce et publicité digitale

De tous les acteurs que nous avons interrogés, les PME de e-commerce sont les plus affûtées sur l'utilisation de modèles et d'algorithmes mathématiques. L'intégration entre productivité et expérience client est critique pour ces PME face à un internaute volage, une concurrence exacerbée et souvent supranationale et des marges faibles.

“ Nous avons, en interne, toute la compétence algorithmique pour être toujours optimal sur l'expérience client. Nous développons, par exemple actuellement, un moteur d'affectation automatique de produits par catégories sur la base d'un réseau bayésien. Notre objectif : aller 10 fois plus vite dans l'intégration d'un nouveau site web et proposer le meilleur aux consommateurs. ”

déclare le dirigeant de Neteven, PME spécialisée dans le e-commerce.

Discours similaire pour une *start-up* qui réinvente le repas du soir à domicile :

“ Nous innovons dans la livraison à domicile en proposant 2 plats frais tous les soirs livrés en moins de 10 minutes n'importe où sur Paris. L'algorithme d'optimisation des parcours de mes coursiers est évidemment au cœur de mon activité. ”

Une approche déjà bien développée dans le secteur publicitaire. Pour le CEO de Sirdata, leader montant du *pretargeting* et de la data publicitaire :

“ les algorithmes prédictifs valorisant les données comportementales sont au cœur de la transformation des métiers de la publicité en extrayant la quintessence de l'audience des éditeurs partenaires, les intentions de consommation des internautes ”

sur un terrain où les réussites de Google, Criteo etc. ouvrent la voie à encore plus d'innovation entrepreneuriale.

3.4.5 Industrie et énergie

Les PME industrielles que nous avons interrogées ont investi dans des outils numériques sur leur cœur de métier : conception et fabrication, qui utilisent souvent des modèles mathématiques performants. La valeur potentielle créée par de nouveaux modèles est donc surtout perçue dans des fonctions annexes, et donc rarement stratégique.

“ Nos projets clients durent au minimum 3 ans, ce qui nécessite un investissement financier important, ”

nous indique Tronics, fondateur de composants électroniques à façon.

“ La modélisation pourrait nous aider à évaluer le risque associé à un projet. Cela permettrait non seulement de couvrir financièrement ce risque, mais aussi d'organiser les équipes opérationnelles autour de ce modèle de risque. ”

On retrouve ici le même besoin que dans le BTP, à savoir pouvoir appréhender le risque de manière objective et rationnelle, ce que la modélisation mathématique permet de faire.

“ Nous sommes pour le moment en train de numériser notre chaîne de production, ”

nous indique une PME qui fabrique des meubles pour les hôtels.

“ Une fois numérisée, il serait effectivement intéressant de pouvoir utiliser les données produites dans le cadre d'un modèle plus global, comme par exemple le BIM. ”

Des *start-up* viennent pourtant innover avec des gains de coûts significatifs comme Energiency, éditeur de solutions en rupture pour accélérer les économies d'énergie dans l'industrie :

“ grâce à notre solution 100 % cloud, nos clients énergivores disposent d'algorithmes prédictifs à moins de 1 % d'erreur et bientôt d'applications à lunettes connectées au plus près de leurs process industriels pour gagner des millions d'euros de performance énergétique. ”

3.4.6 Services

Sur les marchés de service aux entreprises ou aux personnes, traditionnellement très peu numériques, voici 3 *start-up* interrogées qui utilisent la modélisation pour créer une réelle rupture sur les services juridiques, le déménagement ou le stationnement.

CaptainContrat :

“ **Le cœur de notre savoir-faire est la modélisation des contrats et leur génération automatisée. Nos clients remplissent un questionnaire en ligne, ce qui génère un contrat totalement personnalisé transmis directement à un avocat qui le finalise et l'envoie au client quelques heures plus tard ! C'est un changement complet dans la relation traditionnelle aux services juridiques.** ”

On voit bien dans cet exemple comment un secteur peut être bouleversé par un algorithme adapté, qui optimise tout à la fois productivité et expérience client.

“ **Nous voulons révolutionner le marché du déménagement grâce à un algorithme** ”

déclare le dirigeant de la société DesBrasEnplus.

“ **Nos clients peuvent personnaliser en ligne leur déménagement, choisir le créneau de leur choix, le tout pour un tarif 2 fois moins cher qu'ailleurs et une qualité de déménagement optimale.** ”

Le secret ? DesBrasEnplus utilise un algorithme de *yield management* performant qui lui permet d'optimiser en temps réel la gestion des flottes de camions et l'affectation des déménageurs en orientant le client dans son choix de date de prestation.

Pour le directeur général de Neoparking, leader de la réservation en ligne de parkings, c'est une toute nouvelle approche de la mobilité multimodale centrée sur le client, qu'apportent les algorithmes et la data du stationnement. Il s'agit d'une véritable transformation en profondeur du métier du stationnement.

“ **On passe d'une rente passive d'infrastructure en une plateforme biface simplifiant en temps réel la vie de l'automobiliste et optimisant l'investissement immobilier par l'usage.** ”

3.4.7 Média / Édition

Les médias et éditeurs de contenus (musique, livres, films) subissent l'impact du numérique de plein fouet depuis 10 ans : numérisation des contenus, piratage, effondrement des ventes physiques, changement de *business models*, omniprésence de Google dans l'accès aux contenus, etc. Leur objectif (et parfois leur survie) dépend de leur capacité à recréer du lien avec le consommateur final, auditeur, lecteur, spectateur. La modélisation mathématique est un facteur important dans cette reconquête.

“ **Nous avons de la vraie Big Data consommateur** ”

déclare le directeur digital d'un leader mondial de la production cinéma et *Home Entertainment*,

“ **grâce à notre application en ligne, nous collectons d'énormes quantités de données dans le but de comprendre, prévoir et recommander des contenus à nos clients avec une finesse inégalée.** ”

Néanmoins, les compétences de *data-scientists* sont rares, et il est toujours difficile d'internaliser les ressources.

Même son de cloche dans une grande maison d'édition :

“ **Face à la concurrence d'Amazon, nous ne pouvons plus nous permettre de rester simples éditeurs de livres. Nous cherchons à proposer une expérience beaucoup plus riche à nos lecteurs autour d'un ouvrage, et qui intègre le numérique, la liseuse ou la tablette.** ”

Dans le cadre de ces nouveaux usages, les algorithmes mathématiques sont requis pour l'analyse statistique des très grandes quantités de données comportementales des lecteurs. Cela conduit là encore, à mieux comprendre les attentes des clients, et à terme pouvoir mieux les accompagner dans la lecture de leurs prochains livres.

3.4.8 Transport

Le secteur du transport déjà très informatisé utilise des algorithmes d'optimisation des tournées et des parcours.

“ La logistique est déjà un secteur mature pour l'offre logicielle pour monitorer, prédire, optimiser jusqu'à des cartes temps réel et bientôt de la réalité augmentée de suivi (...) des requêtes sur des modèles de haut niveau et la maîtrise accrue des aléas en dynamique pourraient ouvrir de nouvelles manières de servir le client ”

déclare un responsable de IDLogistics, société spécialisée dans l'optimisation logistique pour les entreprises.

Depuis peu, le développement des smartphones et des capteurs intégrés aux véhicules de transport (automobiles, camions, bateaux) donne accès à de nouvelles données et ouvre de nouvelles perspectives. C'est la promesse que porte aujourd'hui la société SaveCode, avec sa solution de compagnon de route qui récompense une éco-conduite responsable.

“ Notre algorithme calcule en temps réel la consommation d'essence sur la base de l'accélération du véhicule. Ce qui nous permet d'évaluer l'impact de la conduite en temps réel. ”

D'autres sociétés nous ont, aussi, fait part de l'importance que vont prendre ces nouvelles données véhicules pour la création de services innovants et la transformation du rapport au transport. Les modèles appliqués aux véhicules connectés permettront peut-être demain, de créer de nouvelles propositions de valeur en matière d'assurances ou de gestion de risques (d'après le directeur de la stratégie commerciale groupe de Renault), d'effectuer des recommandations en fonction de la nature de la conduite, ou encore d'aider les affrêteurs de véhicules / navires à optimiser l'utilisation de leur flotte (d'après Nathalie Olszewski chez Bourbon, l'un des leaders des services maritimes à l'*offshore* pétrolier).

3.4.9 Télécom

Le secteur des télécoms est évidemment déjà très numérisé, et, si historiquement la modélisation est de longue date utilisée sur la conception et l'exploitation des réseaux, infrastructures et équipements technologiques. Elle joue désormais également un grand rôle dans l'interaction avec les clients (CRM).

“ Dans un contexte où la concurrence est très rude, la prédiction du churn est un élément clé de notre métier ”

déclare le directeur marketing de La Poste mobile.

“ Nous n'avons pas la compétence en interne pour modéliser le comportement de nos clients, mais nous faisons appel à des sociétés externes spécialisées et qui fournissent de très bonnes prédictions. À nous, ensuite, de mettre en place des actions préventives pour éviter que nos clients à risque ne passent à la concurrence. ”

La prédiction du *churn* s'appuie sur des modèles mathématiques statistiques sophistiqués basés sur les typologies d'interaction entre l'entreprise et les clients. Des pratiques également très en vogue du côté des grands opérateurs télécoms que nous avons interrogés.

3.4.10 Assurances

Finissons notre tour d'horizon sectoriel par l'assurance, un secteur historiquement très familier de l'usage de modèles quantitatifs, notamment actuariels, au cœur du métier de tarification et de contrôle des risques.

Actuellement en pleine transition digitale, des répercussions considérables y sont identifiées concernant la gestion de la relation client mais aussi, plus profondément, concernant les principes même de mutualisation (à la base du métier de l'assureur et de l'organisation de ses fonctions).

Pour Pierre-Alain de Malleray, Directeur général du groupe Santiane devenu en moins de 5 ans le premier courtier français spécialiste en santé, le pilotage du processus de vente lui-même peut bénéficier d'algorithmes pour assurer l'optimisation de la force commerciale.

Plusieurs grands assureurs mènent par ailleurs d'importants chantiers concernant l'évolution des métiers actuariels et du rapport aux données : passant de SI internes sous contrôle propriétaire à une approche horizontale et hétérogène nécessitant des modèles radicalement innovants.

Pour Alain Burtin, Directeur Marchés, Intelligence Clients & Services chez Allianz France, il s'agirait là d'une toute nouvelle approche de la quantification des risques, et de la relation à l'assuré dont le comportement est contrôlé pour ajuster la tarification de sa prime.

3.4.11 Synthèse

D'une manière générale, les interviews et les différents exemples qui ont été évoqués montrent que la modélisation, les données et la simulation numérique peuvent jouer un rôle stratégique pour les PME dans différents contextes :

- marketing : comprendre et prédire le comportement de ses clients grâce aux données d'interaction (CRM) ;
- opérations : identifier et simuler les axes de performance et de réduction des coûts ;
- innovation : proposer de nouveaux services basés sur de nouvelles données, transformer l'expérience client tout en optimisant la productivité de l'entreprise.

Une majorité des entreprises interrogées les utilisent ou envisagent de les utiliser mais de nombreux freins demeurent. Pour le directeur général d'Eurodécision, acteur expert depuis 25 ans en recherche opérationnelle et optimisation (conseil, logiciel, service), l'expertise en modélisation est décisive pour apporter des solutions d'aide à la décision dans les domaines de la logistique, de la production, des ressources humaines, du *revenue management* et de la conception de produits industriels ; pourtant

“ (...) du côté des PME et ETI, la prise de conscience de l'apport d'outils d'aide à la décision à base de mathématiques appliquées nécessite un travail important de sensibilisation. Le passage par des phases d'étude / prototypage de quelques semaines est indispensable avant de lancer un projet dont le périmètre, le budget et les délais seront maîtrisés (...). ”

Nous avons cherché à comprendre quel(s) bénéfice(s) pouvaient en attendre les entreprises interrogées en priorité : en particulier, si le bénéfice attendu était perçu par l'utilisateur final dans l'expérience du produit ou du service, ou s'il était attendu plutôt sur un gain de productivité.

Dans certains cas, lorsqu'il s'agit d'un service digital, ces 2 notions se mêlent puisque la production du service est réalisée en même temps que sa consommation.

Nous avons noté que dans la quasi-totalité des entreprises, l'impact recherché portait sur un gain de productivité avant tout. Dans l'industrie, il s'agit d'optimiser les processus de conception, de production, de certification ou de contrôle. Dans le domaine de la *supply chain*, il s'agit d'optimiser au plus juste les tournées ou les routes empruntées en fonction des clients à servir et de certains aléas.

Les interviews montrent que, dès lors que la modélisation répond à un besoin non couvert par un logiciel utilisé dans l'entreprise (progiciel spécifique au monde du transport, logiciel intégré dans les machines-outils,...), la mise en œuvre de la modélisation se complique singulièrement. Certains mentionnent la compétence de leurs ingénieurs dans ce domaine, d'autres déplorent le manque d'attractivité de leur entreprise pour des profils « maths » ou bien l'absence de département R&D. Ces constats sont en phase avec ceux évoqués par l'étude de l'impact socio-économique des Mathématiques en France mentionnée ci-dessus.

Ces freins expliquent certainement le constat que nous faisons quant à l'absence de l'utilisation de la modélisation et de la simulation dans l'amélioration directe de l'expérience client. Ceci est particulièrement dommageable car il est probable que s'y trouve le plus gros gisement de valeur pour les entreprises : c'est notamment ce que montrera l'analyse ci-après sur l'avant-garde de l'économie digitale tant chez les géants mondiaux existants que chez les *start-up* en rupture.

“

Alors que les PME-ETI représentent plus de 50 % de l'économie française, notre étude exploratoire de 15 000 entreprises financées par des aides publiques et le retour d'expérience initiatives d'avant-garde GENCI et AMIES montrent que seule une petite fraction de techno-providers ont été cofinancés sur les technologies de modèles et algorithmes. Pourtant notre sondage dédié montre une appétence non satisfaite pour de nombreux sondés, souvent faute de compétences en interne. L'intérêt stratégique pour améliorer la productivité est majoritairement reconnu. Moins nombreux sont ceux qui anticipent la transformation radicale de l'expérience client et de la chaîne de valeur, sauf dans les secteurs déjà exposés à la transition digitale (e-commerce, médias, publicité...).

”

OCÉAN BLEU : MODELES ET ALGORITHMES AU CŒUR DE LA DISRUPTION DIGITALE ENTREPRENEURIALE

4.1 Au cœur de la transition digitale, les modèles et algorithmes permettent la désintermédiation massive et la scalabilité

4.1.1 Des technologies constitutives des nouveaux géants du numérique

À regarder de plus près la capitalisation et le pouvoir d'influence réel des grandes entreprises, on sait qu'aujourd'hui les vrais géants sont digitaux. Tant Google qu'Amazon sont fondamentalement des business de nature « algorithmique » *via* les moteurs de recherche et de recommandation, mais aussi d'optimisation logistique, d'apprentissage, d'optimisation stochastique etc., qui en font le cœur technologique à innovation soutenue.

“ À titre d'exemple, notre moteur de recherche s'appuie sur des algorithmes de data mining et d'apprentissage pour construire des modèles de base ; et nous appliquons des algorithmes d'extraction pour identifier des attributs et des entités à partir de descriptions non structurées, permettant ainsi aux clients de focaliser leurs recherches et de trouver plus rapidement leur produit. Nous prenons en compte un grand nombre de facteurs pour prédire la probabilité d'un type d'intérêt du client et pour optimiser le ranking. La diversité des produits exige l'usage de techniques modernes de régression de type « random forests » sur des arbres de décision pour incorporer de manière souple des milliers d'attributs d'un produit. Quel résultat final pour un tel logiciel « sous le capot » ? Des résultats rapides et précis du moteur de recherche pour vous aider à trouver ce que vous recherchez (...).

Tout l'effort que nous apportons à la technologie n'aurait pas une telle importance si nous gardions de côté la technologie dans une sorte de département de R&D, mais ce n'est pas ce que nous faisons. La technologie imprègne toutes nos équipes, tous nos procédés, l'intégralité de notre prise de décision et de notre démarche d'innovation dans tous nos métiers. ”

Why I, Jeff Bezos, Keep Spending Billions On Amazon R&D
Business Insider, Avril 2011

“ **Chez Amazon, la distribution est vue comme un très grand problème d'ingénierie. Les algorithmes définissent tout, depuis la meilleure façon d'aménager la vitrine digitale jusqu'à la méthode optimale pour livrer un colis. D'autres grands du secteur dépensent des fortunes en publicité et n'embauchent que quelques centaines d'ingénieurs pour faire tourner les systèmes. Amazon préfère se contenter d'un modeste budget publicitaire mais salarie des milliers d'ingénieurs diplômés d'universités comme le MIT, Carnegie Mellon ou Caltech.** ”

Amazon's massive investments in technology shape the future for retailers everywhere - MIT Technology Review, George Anders, 7 novembre 2013

Mais bien au-delà, cela concerne aussi largement les nouveaux venus des années 2010 : les applications intelligentes, à base de modèles de connaissance et d'algorithmique, sont l'un des facteurs-clés de succès des acteurs comme AirBnB dans l'hôtellerie ou d'Uber dans le transport, les deux *start-up* américaines à plus forte valorisation en 2015. Les moteurs de recommandation de Netflix, les applications basées sur un moteur affinitaire comme Tinder ou Kudoz en sont d'autres exemples. Citons aussi Climate Corporation, *start-up* ayant transformé les couvertures agricoles à base de données et de modèles, rachetée pour une valorisation – exceptionnelle dans un tel secteur – de près d'1 milliard de \$ par Monsanto en 2013. Et enfin Palantir Technologies, *pure-player* précurseur du *Big Data* provenant de Palo Alto Issu initialement du marché du renseignement et désormais élargi à de nombreux marchés de services aux entreprises, cette société s'est hissée depuis sa création en 2004 à la position - *astronomique pour un éditeur de « modèles et algorithmes de nouvelle génération »* - de 3^e *start-up* américaine à plus forte valorisation (20 milliards de \$) derrière Airbnb et Uber.

4.1.2 L'algorithmique permet une relation intime et « apprenante » à des clients en masse

Comme le propose l'étude *TheFamily* sur la Transition Numérique au Cœur de la Stratégie d'Entreprise, la transition numérique se fonde sur « l'alliance avec la multitude » et particulièrement ce qui concerne la donnée recueillie et exploitée.

La collecte de données permet une connaissance à la fois massive et fine du client et de ces usages. La réinjection rapide et significative dans les processus opérationnels permet d'adapter les produits et les services en eux-mêmes et pas seulement leurs modalités de vente ou de distribution. C'est l'un des atouts décisifs permettant à ces acteurs digitaux de construire une désirabilité sans égal par leurs clients, et ce à une échelle massive. Tout ceci supposant évidemment de la modélisation statistique à grande échelle et à finesse croissante.

L'exemple du service d'UberPool est édifiant sur le lien direct entre les technologies mathématiques, la data et l'apport continu de valeur au client.

“ **Quand Uber a lancé son offre à bas coût UberX durant l'été 2012, l'entreprise a très rapidement réalisé que la demande de transport est FORTEMENT élastique. Quand l'entreprise a réussi à baisser de plus en plus les prix à la course, la demande s'est massivement accrue. Une course à moindre coût unitaire représentait une bien meilleure proposition de valeur pour le client, tout en restant une excellente décision pour l'entreprise du fait de l'augmentation de la demande. Armée de cette nouvelle découverte, Uber s'est tournée vers son légendaire « département de mathématiques » pour tenter de baisser encore les prix. C'est le nom que le fondateur et Directeur général Travis Kalanick a donné à son équipe de scientifiques et mathématiciens purs qui ont conçu les algorithmes de routage. La technologie d'Uber va bien au-delà des applications smartphone visibles par les clients ; il y a du côté du serveur un système intelligent apportant une prévision de demandes, d'encombrements, d'équilibrage, de positionnement et d'affectation de l'offre et de tarification dynamique. Ce sont ces systèmes-là qui permettent d'assurer plus d'1 million de courses par jour dans le système Uber. Le « département de mathématiques » et la direction ont compris que s'ils pouvaient augmenter le taux d'utilisation des chauffeurs (nombre de courses par heure pour un chauffeur donné), ils pourraient alors baisser le prix pour l'utilisateur final, tout en maintenant la qualité de revenu pour le chauffeur. ”**

B. Gurley – Above The Crowd – Uber's new BHAG UberPool (2015)

L'étude « Le numérique déroutant »¹⁴ publiée par **Bpifrance Le Lab**, en collaboration avec Olivier Sichel, PDG du groupe LeGuide, illustre son propos en prenant comme exemple le secteur du tourisme. De nouveaux acteurs ont su réduire l'asymétrie d'information qui existait entre les consommateurs et les producteurs, en proposant des applications web qui incluent des services de recherche, de comparaison et de recommandation. Les recherches peuvent porter sur des critères classiques de destination mais également sur des critères plus inhabituels comme le budget, le type d'hôtel, etc. La mise en place de ces nouveaux services « temps réel » n'aurait pas été possible sans l'utilisation d'algorithmes et de modèles performants (graphes en particulier) :

“ **Le consommateur final détient un « certain » pouvoir sur la filière. Ce pouvoir de choisir, de dire et de partager son avis devient des inputs fondamentaux : les Big data, les algorithmes, les graphes en sont les outils. ”**

Étude **Bpifrance Le Lab**
Le numérique déroutant (2015)

14. Le numérique déroutant n'a pas d'autre objectif que de susciter une prise de conscience forte de la part [...] des chefs d'entreprise de PME, sur les aspects disruptifs du numérique.

4.1.3 La modélisation est essentielle à la scalabilité des nouveaux business models

La modélisation est, par ailleurs, l'un des outils essentiels de la « scalabilité » : en phase de croissance, la modélisation (notamment la modélisation logicielle des processus) devient un atout décisif pour automatiser et piloter les processus en abaissant au maximum les coûts de déploiement et l'apprentissage formalisé des retours utilisateurs. Nouvelle raison pour laquelle la modélisation est décisive pour les *start-up*. En effet, celles-ci ne peuvent survivre que si elles croissent extrêmement vite pour prendre une position influente sur les usages émergents et bénéficier de la prime de premiers entrants.

Dans ce contexte, il faut probablement voir la modélisation non seulement comme source d'opportunité en tant que technologie accompagnant l'innovation de compétitivité des filières existantes, notamment les PME, mais plus encore comme l'un des accélérateurs de la transformation en profondeur des chaînes de valeur décrites par l'étude **Bpifrance Le Lab** sur « *Le numérique déroutant* ».

Il est donc essentiel pour les PME de comprendre l'incidence stratégique des modèles et algorithmes. Bien au-delà de la filière de simulation *Big Data* elle-même, qui reste une niche à l'échelle de l'économie globale mais surtout pour la grande masse des entreprises peuplant la plupart des filières économiques, comme par exemple le BTP, les assurances, l'agroalimentaire, la logistique, etc.

4.2 La modélisation deviendra-t-elle une commodité ?

Longtemps l'apanage de grandes expertises sophistiquées et de longs cycles de développement, la modélisation peut aujourd'hui être massifiée et mise au profit d'innovations de rupture grâce à un coût incomparablement plus modeste. Calibrer et déployer des algorithmes de *yield management* dans les services à la personne est désormais une affaire de quelques trimestres. À titre d'exemple, les premières compagnies aériennes ou électriques prirent près d'une décennie pour les expérimenter dans l'optimisation de la tarification des vols ou du planning des barrages hydroélectriques.

C'est d'ailleurs parce que la modélisation devient une commodité, qu'elle permet à des *start-up* de concevoir et d'opérer des innovations disruptives. Il n'y a plus besoin en effet :

- 1 ni de grands services d'ingénierie et R&D réunissant des centaines d'années-homme ;
- 2 ni d'investissements matériels lourds pour tester les produits physiques ;
- 3 ni d'investissements forts en infrastructures de calcul ou stockage, grâce au *cloud*.

C'est dire la suppression d'une grande partie des barrières capitalistiques protégeant la conception et le développement des « cathédrales » industrielles des 30 glorieuses.

Il est bien probable que « l'océan bleu » de la création d'entreprises digitales entretienne et accélère la chute du coût de la modélisation : standardisation, passage à l'*open source*, diffusion massive... La massification de la production de modèles peut bientôt ressembler à la massification de la production de contenu éditoriaux *post-bloggers*... Qui donc captera la valeur dans la filière logicielle ? Comme le rappelle l'étude *TheFamily* sur La Transition Numérique au Cœur de la Stratégie d'Entreprise :

“ Comme souvent après les grandes vagues d'innovation suivies de phases de banalisation, la valeur déserte la technologie pour se loger dans les produits que cette technologie permet de mettre au point. ”

4.3 Et ce n'est pas fini : objets connectés et imprimantes 3D vont encore accentuer ces tendances

Dans le secteur jugé « traditionnel » du bâtiment, les modèles numériques deviennent omniprésents avec l'utilisation du BIM (*Building Information Model*), les outils de PLM (*Project / Product Lifecycle Management*) ou l'invasion des objets connectés envahissant la maison et donnant un coup d'accélérateur à la domotique. Pourtant, si le PLM et BIM sont certes adoptés par les grands du secteur, ils le sont encore très peu par les PME. C'est encore moins le cas de l'approche nettement plus disruptive de la modélisation sous-jacente aux imprimantes 3D à grande échelle, fabriquant sur place et sur-mesure des éléments architecturaux voire les bâtiments en entier.

4.4 Un océan d'opportunités entrepreneuriales qui réclame une nouvelle approche : centrée sur les réseaux sociaux, la data, le probabiliste...

Une tendance déjà notoire est celle de l'avènement du *cloud computing* - s'appuyant sur des puissances de calcul distantes et potentiellement mutualisées et consommées à l'usage - et la distribution en mode « *Software-as-a-Service* » (SaaS) - qui remplace le modèle traditionnel d'achat de licence en abonnement récurrent. Ce basculement de modèle économique ouvre potentiellement la voie à une « commoditisation » accélérée de la modélisation, en fractionnant le coût logiciel à l'usage et mutualisant le coût matériel serveurs en économie collaborative. La quasi totalité de l'économie va pouvoir en bénéficier de manière accélérée, des entreprises les plus grandes aux très petites, en passant par les créations d'entreprise (cf. figure 20).

Plus radicale encore est l'émergence rapide de fournisseurs de services de nature finalisée aux entreprises (BtoB), voire aux personnes (BtoC) intégrant de manière critique de la modélisation. C'est particulièrement le cas du *Big Data / analytics* qui permet l'émergence rapide des services digitaux finalisés en BtoB voire BtoC : places de marché, produits financiers ou d'assurance spécialisés, plateforme de ciblage publicitaire, de géolocalisation et d'optimisation logistique, de réservation, de déménagement...

Au sein de ces usages digitaux en rupture, l'actif technologique déterminant est l'algorithmique. Celle-ci est souvent redéveloppée intégralement en interne « *from scratch* », désintermédiant ainsi la chaîne verticale historique d'éditeur de briques scientifiques, fonctionnelles commanditées par

l'ingénierie puis par les intégrateurs DSI et par un marketing d'usages finalisés. Avec un petit nombre de mathématiciens appliqués / *data scientists* sachant coder, et une infrastructure *cloud*, une *start-up* peut en quelques années prendre des parts de marché colossales sur la réservation de parkings, l'assurance de biens, le déménagement...

Ces nouveaux entrants échappent complètement au marché visible et lisible des technologies de modélisation car ils n'en vendent pas : ils vendent du service digital finalisé. Voire, ils n'achètent même pas de licences de modélisation à des éditeurs classiques, car ces entrants redéveloppent souvent à partir de briques élémentaires *Open Source*. Pourtant, ces acteurs pourraient rapidement devenir la « partie immergée de l'iceberg » représentant le volume de création de valeur le plus massif à base de modèles et algorithmes.

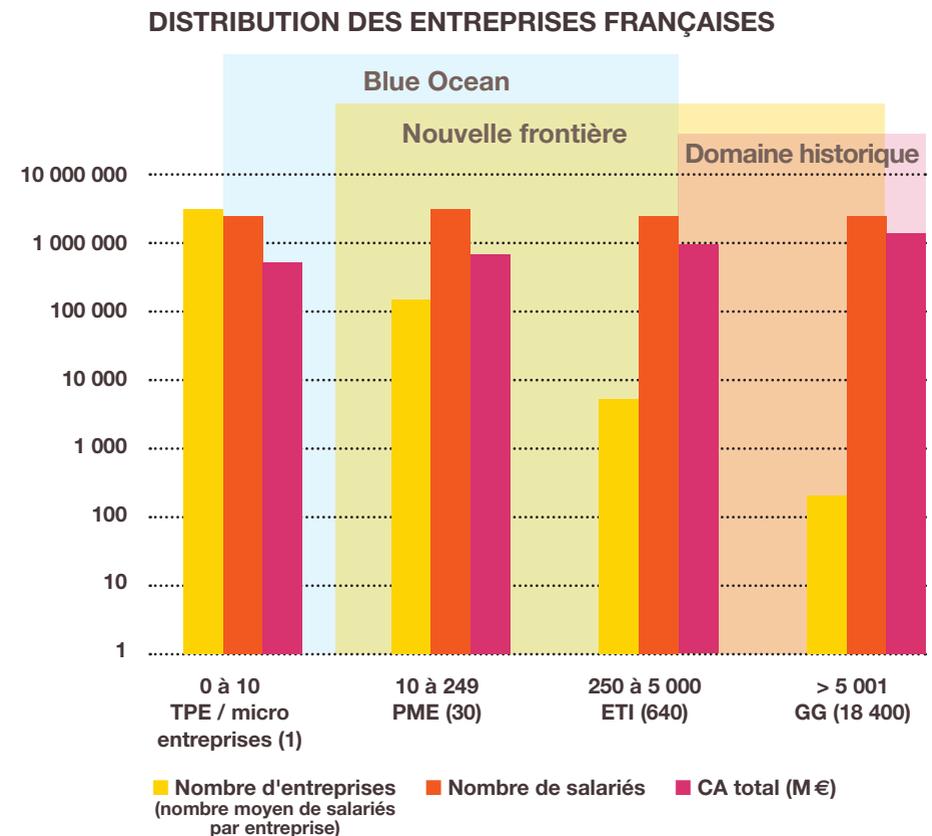


Figure 20 : Démographie des entreprises françaises (source Insee retraitée sur échelle logarithmique) et domaines d'application de la modélisation future.

Un océan d'opportunités de création d'entreprises s'ouvre dans ce contexte : on peut le voir, d'ores et déjà, dans les données du concours de création d'entreprises i-lab / Creadev (cf. la figure 21 ci-dessous) sur les secteurs dans lesquels des entreprises à base de modèles et algorithmes se développent. Il s'agit des services aux entreprises, mais aussi des services à la personne, de la distribution, du e-commerce bien entendu, du multimedia / entertainment, autant de secteurs quasi absents des applications traditionnellement financées par la R&D plus amont (projets FUI).

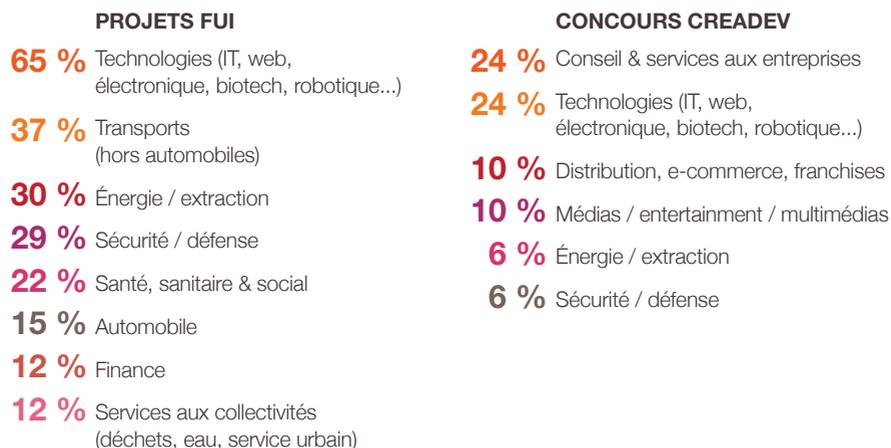


Figure 21 : Proportion par secteurs socio-économiques de projets intégrant de manière significative de la modélisation parmi les financements FUI (à gauche) ou le concours de création d'entreprises i-Lab / ex-Credev (à droite).

Infrastructure de base pour bon nombre de *start-up* actuelles, la modélisation prend pour autant un visage bien différent de la modélisation historique, comme l'illustre la figure 22 :

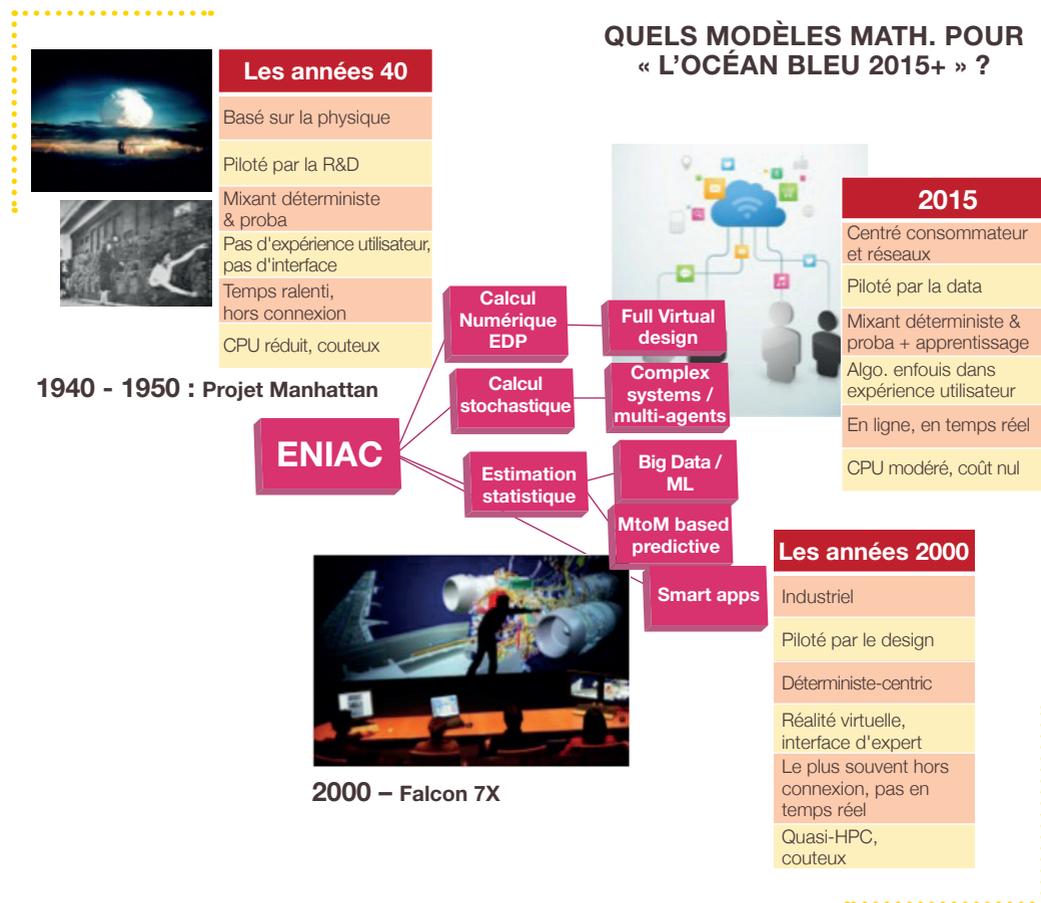


Figure 22 : Quelques évolutions clés sur les usages et technologies de modélisation d'hier à aujourd'hui.

Historiquement la modélisation était l'affaire d'ingénieurs, et commanditée dans un contexte de conception. Elle était basée avant tout sur des modèles physiques, de nature déterministe. Son développement, planifié sur de longues périodes, était très intermédié par rapport aux usages finaux, à grande distance du marketing.

L'approche doit désormais être toute autre : au plan scientifique et technologique, les modèles doivent avant tout être pensés dans un contexte dominé par les données, en temps réel, relié aux graphes complexes de réseaux sociaux massifs, et fondamentalement capables de gérer l'incertain, la variabilité.

Tout cela signifie un couplage en profondeur et à forte scalabilité de modèles numériques et d'approches probabilistes et statistiques : ce qui constitue probablement l'une des principales révolutions depuis l'avènement du calcul scientifique industriel pour Philippe Pasquet, expert depuis 40 ans dans le domaine spécifique de la mécanique computationnelle et de l'ingénierie numérique.

Mais plus fondamentalement encore, on n'achète plus nécessairement de licences de codes complexes de simulation, mais un service digital finalisé où la modélisation est enfouie autant que possible... Elle bénéficie d'un développement « agile » accompagnant l'évolution accélérée des usages. Dans une approche très entrepreneuriale, domineront les innovateurs les plus rapides à exécuter une vision d'avant-garde.

“

Au fond, les modèles et algorithmes deviennent l'infrastructure fondamentale pour la « disruption » digitale de l'économie tout entière, à la fois en tant qu'actifs stratégiques des géants numériques existants et en tant qu'infrastructure décisive pour l'émergence accélérée de start-up. Le centre de gravité des technologies bascule depuis le calcul historiquement intense en sciences de l'ingénieur, développé sur de lourds cycles et longues chaînes de valeur, en allant vers le stochastique, l'apprentissage fortement piloté par les données, le rôle décisif de l'expérience utilisateur et le développement agile et entrepreneurial.

”

NOS PROPOSITIONS EN CONCLUSION

Bilan historique, analyses de données de dizaines de milliers de projets de R&D et enquêtes exploratoires auprès de milliers d'entreprises menées dans le présent Livre Blanc. Tout converge pour montrer le rôle décisif que jouent les technologies de modèles et algorithmes dans les bouleversements de l'économie actuelle.

L'importance des développements technologiques a été reconnue et massivement soutenue de longue date par les financements publics français. Pourtant, de vastes secteurs de l'économie délaissés par les acteurs historiques de la filière - et les centaines de milliers de PME qui y forment le cœur du tissu des entreprises françaises - n'ont pas encore pris la pleine mesure du potentiel de croissance associé.

Bien plus fondamentalement encore, la « disruption » de l'essentiel de l'économie par la transition digitale s'accompagne en fait, d'une évolution accélérée de la modélisation. Omniprésente au cœur du *Big Data* et des objets connectés, les technologies de modélisation pourraient devenir, en bonne partie, une commodité avec l'effondrement des coûts d'usage (*cloud*, puissance CPU, briques *open source*...).

Cela permet donc de bâtir rapidement des acteurs de services digitaux en rupture dans n'importe quel secteur économique (dont notamment les services aux entreprises et services à la personne). Cela remet *a contrario* en cause des barrières à l'entrée dont disposaient jusqu'à présent les acteurs du secteur (éditeurs, intégrateurs, constructeurs, grandes ingénieries industrielles...).

ANNEXES

LEXIQUE

AMIES – Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société

BIM – *Building Information Modeling*, modèle d'information unique du bâtiment ou encore Maquette numérique du Bâtiment (MNB)

BtoB / BtoC – *Business-to-business, business-to-consumer*

CAO – Conception assistée par ordinateur

CFD – Mécanique des fluides numérique

CPU – *Central processing unit*

CRM – Outil de gestion de la relation client

DSI – Directeur des systèmes d'information

ENIAC – *Electronic Numerical Integrator and Computer*, le 1^{er} ordinateur de l'histoire

ERP / BI – *Enterprise Resource Planning / Business Intelligence*

FUI – Fonds unique interministériel, programme destiné à soutenir la recherche appliquée collaborative, notamment *via* les pôles de compétitivité

GENCI – Grand Équipement national de Calcul intensif, société civile destinée

HPC – *High-Performance Computing* ou, de manière équivalente, calcul intensif

I-lab (ex « Creadev ») – Concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes (**Bpifrance**)

MSO – Modélisation, simulation & optimisation

PEPS – Projet exploratoire proposé par AMIES / CNRS

PLM – *Product lifecycle management*

R&D ou RDI – Recherche & développement (et innovation)

SaaS – *Software-as-a-service*

SAS – Logiciel d'analyses statistiques

SEME – Semaine d'étude en mathématiques, initiative d'AMIES

SSII – Société de services en ingénierie informatique

TPE, PME, ETI – Très petites entreprises (<10 personnes), petites et moyennes entreprises et entreprises de taille intermédiaire, catégories été définies par les directives européennes en fonction des effectifs (PME < 250 personnes, ETI de 250 personnes à 4 999 personnes) complétés par des limites de chiffres d'affaires et taille de bilan.

BIBLIOGRAPHIE ET SOURCES

Economic Benefits of Maths Science research - Deloitte (2012)

Le marché du calcul intensif et de la simulation numérique - Xerfi France (2013)

Rapport Roucairol, La simulation haute performance au service de la compétitivité des entreprises, Gérard Roucairol - (12 avril 2013)

Transition numérique des industries - Usine Nouvelle - (2014)

Accélérer la mutation numérique des entreprises : un gisement de croissance et de compétitivité par la France – McKinsey France - (2014)

Du rattrapage à la transformation : L'aventure numérique, une chance pour la France – Une étude sur la maturité numérique des entreprises françaises effectué par Roland Berger, (2014)

Livre Blanc Big Data - EBG – (2014)

Le numérique déroutant – **Bpifrance Le Lab** en partenariat avec Olivier Sichel – leguide.com (2015)

Etude sur l'impact socio-économique des mathématiques EISEM – AMIES en partenariat avec la Fondation Sciences Mathématiques de Paris (FSMP) la Fondation Mathématique Jacques Hadamard (FMJH), et en association avec les Labex de mathématiques (2015)

Livre Blanc Big Data : l'Accélérateur d'Innovation, G9+ en partenariat avec Renaissance Numérique (2014)

La Transition Numérique au Cœur de la Stratégie d'Entreprise, Étude TheFamily en partenariat avec le Groupe Caisse des dépôts et le Groupe La Poste (2014)

The Innovator's Dilemma : The Revolutionary Book That Will Change the Way You Do Business, C.M. Christensen (2011)

Crédits données : Bpifrance, Insee, Amies, GENCI, Aremus & Associés

Crédits image : Wikipedia, Dassault Aviation / aerobuzz.fr, Aremus & Associés, Les Sets de Marion, Apple, Amazon ;

www.bpifrance-lelab.fr

www.bpifrance.fr

Réf. : 694801

Achevé d'imprimer sur les presses de l'imprimerie LA GALIOTE-PRENANT
70 à 82 rue Auber – 94400 Vitry-sur-Seine – RCS Créteil B 332 124 072

Imprimé en France : octobre 2015.

Ce document est imprimé avec des encres végétales
sur du papier fabriqué à 100 % à base de fibres provenant
de forêts gérées de manière durable et équitable
par un professionnel labellisé Imprim'Vert.

