La simulation haute performance au service de la compétitivité des entreprises

Rapport au Commissariat Général aux Investissements et à la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services

Gérard Roucairol

Président de Teratec

Président de l'Académie des Technologies

(Mars 2013)

Association TERATEC

Siège Social : Campus Teratec – 2, rue de la Piquetterie - 91680 BRUYERES LE CHATEL –
Tél. : 00 +33 (0)9 70 65 02 10 – infos@teratec.fr – www.teratec.eu

Association régie par la loi du 1er juillet 1901 modifiée et le décret du 16 août 190

Avant-propos

Ce rapport résulte de la mission confiée par le Commissariat Général à l'Investissement (CGI) et la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS) (voir annexe 1).

Il a pour but de préciser les enjeux de la simulation numérique à haute performance en prenant en compte les évolutions et ruptures technologiques qui sous-tendent les générations actuelles et futures d'ordinateurs (dont celle en particulier de l'exaflop ou 1 milliard de milliards d'opérations arithmétiques par seconde).

Ce rapport a aussi pour objectif de proposer des mesures visant à approfondir et renforcer l'usage du calcul intensif dans les filières économiques où il est déjà utilisé, de l'étendre à de nouvelles filières et augmenter le nombre mais aussi la diversité des acteurs capables de l'employer (PME, ETI, Grands Groupes) tout en favorisant la structuration d'écosystèmes adaptés.

L'étude ne porte pas sur le développement détaillé des matériels et logiciels de base de la prochaine génération de calcul haute performance. Une telle réflexion pourra être trouvée au sein des documents élaborés par la plate-forme européenne ETP4HPC (www.etp4hpc.eu).

De même n'est pas visé ici l'usage de la simulation à haute performance au service de la recherche publique mais bien **son utilisation par l'industrie**. En particulier ce rapport n'aborde pas la problématique des moyens publics de calcul ouverts à la communauté scientifique et coordonnés au plan national par GENCI.

La réflexion a suivi le cheminement suivant :

1. l'analyse des usages de la simulation à base de calcul intensif et leurs évolutions;
2. l'étude prospective des ruptures technologiques attendues au niveau des ordinateurs (qui conduit, par ailleurs à recommander la mise en œuvre de programmes de recherche dédiés à leur prise en compte);
3. l'établissement d'un programme ambitieux de développement accéléré des usages du calcul intensif.

La synthèse du rapport et celles de ses recommandations intervient au Chapitre 4.

La liste des grands groupes utilisateurs, consultés pendant l'élaboration du rapport fait l'objet de l'annexe 2, la liste des contributeurs à l'écriture de ce document est donnée en annexe 3.

Remarque :

- les expressions « calcul à haute performance » ou « calcul intensif » sont considérées comme des synonymes ;
- bien que ceci puisse varier d'une filière économique à l'autre en fonction de l'état de la concurrence, de l'existence de solutions de simulation, de la maturité des compétences nécessaires à leur emploi, le qualificatif de « calcul intensif » démarre avec des ordinateurs délivrant quelques dizaines de Teraflops (1 Teraflop = mille milliards d'opérations par seconde) ; le site « Top500 » (www.top500.org) qui fournit deux fois par an la liste des 500 ordinateurs connus les plus puissants dans le monde , fait débuter sa liste de Novembre 2012 à partir de 76,4 Teraflops.

Table des matières

***1.* Simuler pour innover……4**

1.1. Simulation et Calcul à haute performance……5

1.1.1. *To out-compute to out-compete (sur-concurrencer en sur-calculant)* ……5

1.1.2. *Un usage confronté à la rareté des ressources et à leur évolution continue*……7

1.2. Evolution de la Simulation Haute Performance ……8

1.2.1. *Une extension considérable des domaines d'application* ……8

1.2.2. *Un nombre croissant d'acteurs et des enjeux d'adaptation majeurs* ……9

1.2.3. *Une diversification grandissante des méthodes et modèles de la simulation*……10

1.2.4. *Un marché en croissance sur l'ensemble de ses secteurs* …… 14

***2.* L'environnement technologique…… 12**

2.1. Tendances……12

2.1.1. *La prise en compte de ruptures radicales qui anticipent l'évolution de l'ensemble de l'informatique* ……12

2.1.2. *L'ancrage de la simulation dans le monde du réel*……13

2.1.3. *La multiplication des processeurs*……13

2.1.4. *Hybridation et processeurs spécialisés* ……14

2.1.5. *L'évolution des environnements de programmation et de l'algorithmique* ……15

2.1.6. *Co-Conception et standardisation* ……16

2.2. Enjeux technologiques de la haute performance ……16

2.2.1. *Consommation énergétique* ……16

2.2.2. *Parallélisme*……17

2.2.3. *Résilience*……18

2.2.4. *Archivage et accès aux données* ……18

2.2.5. *Pour des programmes de Recherche dédiés à l'atteinte de l'Exaflop et au-delà*……18

3. Les voies du développement en France de la simulation à haute performance……20

3.1. Du matériel aux applications : une situation exceptionnelle en France …… .20

3.2. Un programme d'accélération de l'usage de la simulation à haute performance……22

3.2.1. *Anticiper*……22

3.2.2. *Diffuser* ……23

3.2.2.1. *Promouvoir et animer*……23

3.2.2.2. *Accéder* ……24

3.2.2.3. *Former* ……25

4. Synthèse……26

4.1. Rappel des arguments principaux de l'analyse……26

4.2 Quatre recommandations……28

Annexe1 : lettre de mission

Annexe2 : industriels consultés

Annexe3 : contributeurs

1. Simuler pour innover

En ce début de 21° siècle, marqué par une mondialisation croissante des marchés et des capacités de production, l'innovation joue un rôle important et reconnu pour les entreprises en renforçant et améliorant leur position concurrentielle et ceci de manière durable.

En effet, l'innovation permet d'augmenter la productivité, d'améliorer la qualité des produits ou services ainsi que l'efficacité des procédés industriels ou commerciaux.

Par ailleurs, et ceci est fondamental pour les entreprises européennes et françaises en particulier**,** l'innovation permet également de diminuer l'effet de la concurrence par les prix, en mettant l'accent sur d'autres facteurs de différenciation.

Dans ce contexte la simulation numérique joue un rôle essentiel. Tout au long de la chaine « Conception>Fabrication>Distribution », elle permet à la fois d'élargir et affiner l'exploration du champ des possibles, de diminuer les coûts et les durées notamment en permettant de détecter au plus tôt des erreurs de conception, d'améliorer la qualité et de former les compétences. Elle peut aussi aider à prédire et qualifier la demande et optimiser le positionnement de l'offre.

Donnons déjà quelques exemples.

Dans l'Industrie Automobile, diminuer considérablement le poids d'une voiture pour la rendre moins polluante tout en améliorant sa sécurité ne peut être atteint que par le recours systématique à la simulation numérique.

De même dans le monde de l'Aviation d'affaires, la possibilité d'utiliser des aérodromes proches des centres de décision, c'est à dire situés en zone périurbaine, impose une réduction drastique du bruit des avions, réduction qui ne peut être atteinte sans un usage intensif de la simulation au moment de la conception de l'avion et de ses moteurs.

Dans un domaine complètement différent comme celui de l'élaboration de nouveaux médicaments l'usage de la simulation va permettre la personnalisation des traitements.

Dans des secteurs comme la Cosmétologie, les méthodes qui combinent des approches biologiques avec la simulation numérique constituent une alternative à l'évaluation sur des animaux de la sécurité d'un produit. Ces méthodes conservent donc intactes la capacité d'innovation dans ce domaine.

Dans le domaine des marchés de détail, l'élaboration de modèles statistiques fondés sur une analyse de très grandes quantités de données de consommation conduit à pouvoir fixer les prix et optimiser les marges au niveau de chaque magasin.

Ainsi la simulation numérique devient un élément clef pour renforcer la capacité d'innovation d'une entreprise tout en réduisant les risques et incertitudes qui lui sont liés et en améliorant sa compétitivité globale.

1.1. Simulation et Calcul à Haute Performance

1.1.1. To out-compute to out-compete (sur-concurrencer en sur-calculant)

La Simulation numérique repose sur le maquettage virtuel d'un produit, service ou procédé et leur modélisation mathématique (discrète ou continue) en utilisant une quantité aussi importante que possible de données et mesures.

La recherche d'un caractère innovant du dispositif à simuler ou encore le réalisme et la finesse de cette simulation par rapport à des objectifs industriels donnés requièrent alors un volume considérable de traitements et ceci d'autant plus que dans la plupart des cas ce dispositif est lui-même un système complexe voire un système de systèmes.

Il faut alors disposer de systèmes de traitement offrant la puissance de calcul, la capacité d'archivage de données, les logiciels et les compétences adaptées pour transformer l'usage de la simulation numérique en un véritable avantage concurrentiel.

La puissance de calcul utile à l'obtention de cet avantage concurrentiel varie selon l'état de l'art technique, les secteurs d'activité et les marchés correspondants. Si cette puissance est importante (quelques dizaines de Teraflops au moins), elle ne correspond pas nécessairement à l'emploi des ordinateurs les plus puissants.

Cependant il est clair que le calcul à Haute Performance permet de repousser les frontières de ce qu'il est possible de faire par ordinateur en utilisant les plus rapides d'entre eux. Ainsi, pour une entreprise se positionner sur ces frontières est un gage significatif de maintien d'une capacité d'innovation exceptionnelle.

Par ailleurs la résolution de certains problèmes ne devient possible qu'à partir de certains seuils de puissance.

Soulignons enfin que cette puissance de calcul peut servir deux objectifs différents voire complémentaires.
L'un est de pouvoir réduire autant que possible le temps d'exécution d'un programme par nature complexe en nombre d'opérations à réaliser et s'appliquant à des volumes considérables de données.
Le second objectif peut être de tester et comparer très rapidement un grand nombre de solutions en utilisant le même programme mais faisant s'exécuter en parallèle de multiples instances de celui-ci avec des paramètres différents, notamment à des fins d'optimisations spécifiques.

Ainsi la conception de la prochaine génération de moteurs d'avion consommant moins et étant moins bruyants va nécessiter l'usage des ordinateurs les plus puissants, de même dans le domaine de la Sismique, une simulation plus précise d'un réservoir de pétrole qui permet une meilleur exploitation de ce réservoir ou de diminuer le nombre de forages à effectuer trouve immédiatement un retour sur l'investissement.

Actuellement les ordinateurs les plus puissants et qui deviennent accessibles au monde de

l'Industrie offrent une puissance de l'ordre de 1 Petaflop c'est à dire 1 million de milliards d'opérations arithmétiques par seconde.

Le tableau suivant compilé par IDC aux Etats Unis, donne une idée du champ d'innovations potentielles qu'il est possible de réaliser avec une telle puissance.

Current Petascale Research Areas

Sector	Application Description	Potential Breakthrough/Value of the Work
Aerospace	Advanced aircraft, spacecraft design	Improved safety and fuel efficiency
Alternative energy	Identify and test newer energy sources	National energy security
Automotive	Full fidelity crash testing	Improved safety, reduced noise and fuel consumption
Automotive	True computational steering	Cars that travel 150,000mi without repairs
Business intelligence	More complex analytics algorithms	Improved business decision making and management
Electrical power grid distribution	Track and distribute power	Better distribution efficiency and response to changing needs
Global climate modeling	High-resolution climate models	Improved response to climate change
Cryptography and signal processing	Process digital code and signals	Improved national defense capabilities
DNA sequence analysis	Full genome analysis and comparison	Person-specific drugs (pharmacogenetics)
Digital brain and heart	High-resolution, functional models	New disease-fighting capabilities
Haptics	Simulate sense of touch	Improved surgical training and planning
Nanotechnology	Model materials at nanoscale	Pioneering new materials for many fields
National-scale economic modeling	Model national economy	Better economic planning and responsiveness
Nuclear weapons stewardship	Test stability, functionality (nonlive)	Ensure weapons safety and preparedness
Oil and gas	Improved seismic, reservoir simulation	Improved discovery and extraction of oil and gas resources
Pandemic diseases, designer plagues	Identify the nature of and response to diseases	Combat new disease strains and bioterrorism
Pharmaceutical	Virtual surgical planning	Greatly reduce health costs while greatly increasing the quality of healthcare
Real-time medical imaging	Process medical images without delay	Improved patient care and satisfaction
Weather forecasting	High-resolution forecast models	Better prediction of severe storms (reducing damage to lives and property)

Source: IDC, 2012

Remarque : l'ordinateur actuellement le plus puissant dans le monde (Titan Xk7) délivre une puissance de crête de 17 Petaflops utiles et consomme 8 MW. Il est situé au laboratoire d'Oak Ridge du Département Américain de l'Energie (Top500 Novembre 2012).

1.1.2. Un usage confronté à la rareté des ressources et à leur évolution continue

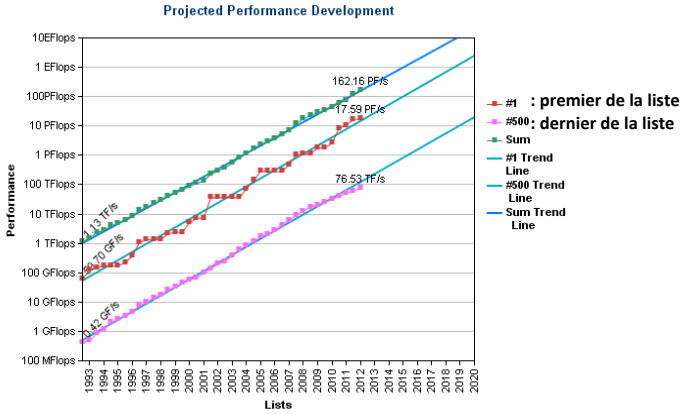
L'informatique de haute performance nécessite des investissements significatifs et de plus en plus importants pour rester au meilleur niveau de performance. Contrairement à certaines industries qui bénéficient d'une accumulation du capital, l'évolution exponentielle des performances implique régulièrement la mobilisation de capitaux significatifs. Désormais, le coût pour la plus haute performance du calcul intensif est de l'ordre de 50 Millions d'Euros et pourrait encore croître. .

Outre le coût d'acquisition du système, les frais de fonctionnement en espace, énergie et refroidissement sont loin d'être négligeables. La mise en place d'un nouveau système conduit fréquemment à la construction ou la rénovation d'un centre de calcul et à l'installation des équipes afférentes.
Dans ces conditions, la mise en place d'offres de « Cloud computing » spécialisées pour la haute performance va permettre de mutualiser les coûts du matériel et des produits logiciels et rendre, par un paiement à l'usage, accessible au plus grand nombre de telles ressources.

Remarquons par ailleurs que l'évolution technologique des matériels et des architectures d'ordinateurs, en ouvrant largement le champ des possibles conduisent à la réalisation de nouvelles méthodes de simulation et la mise au point de nouveaux algorithmes qui vont nécessiter une refonte des logiciels et progiciels existants.
La diffusion de ces nouvelles possibilités est cependant freinée par la rareté des compétences humaines disponibles. En effet, le calcul intensif et la simulation sont des disciplines récentes et en forte évolution d'où de nombreux problèmes de main d'œuvre qualifiée.

Au chapitre 3 seront évoquées des solutions pour surmonter et maîtriser de telles difficultés.

Il n'en reste pas moins que pour une entreprise, l'évaluation de l'avantage concurrentiel fournit par la simulation haute performance résulte bien sûr d'un bilan économique.
Ce bilan doit mettre en balance le coût d'usage des configurations d'ordinateurs utilisées et donc leur taille et leur puissance avec les gains de productivité résultants d'un recours moins fréquent ou de l'abandon d'expérimentations fondées sur des maquettes réelles placées dans un contexte reconstitué pour imiter leur usage futur.
Un exemple classique de l'utilité de tels bilans est celui qui conduit à recourir de moins en moins à des essais en vrai grandeur pour simuler des « crash » de voiture.
La figure suivante illustre la progression continue des performances en prenant comme base la liste annuelle des 500 ordinateurs les plus puissants dans le monde (www.top500.org).
L



1.2. Evolution de la Simulation Haute Performance

1.2.1. Une extension considérable des domaines d'application

L'usage industriel de la simulation est resté pendant longtemps l'apanage de grandes entreprises des secteurs de **l'Automobile, de l'Aéronautique, de l'Energie et de la Défense**.

Au sein de ces secteurs d'activités, l'emploi de méthodes de simulation n'a cessé de se perfectionner pour améliorer les usages existants mais aussi en couvrir de nouveau.

Ainsi l'augmentation de la performance des ordinateurs et l'apparition de nouveaux algorithmes permet régulièrement d'augmenter la taille des modèles et donc la qualité et la précision de la simulation. Citons comme exemple : l'accroissement du nombre de mailles pour simuler un crash de voitures ou pour simuler un réservoir de pétrole.

De nouvelles applications ont été rendues possibles comme la simulation électromagnétique ou acoustique dans l'aéronautique. De nouvelles méthodes et procédés voient le jour. C'est le cas de la conception de nouveaux matériaux par exemple. C'est aussi les progrès vers la mise au point de démarches de simulation à la fois plus globales et plus systémiques.

Outre ces secteurs traditionnels, l'observation montre une pénétration croissante de l'emploi du calcul intensif au sein des domaines de la **Finance**, des **Télécommunications** (simulation de réseaux) ou encore de **la Santé**.
Dans le secteur de la **Chimie** ou de la **Biotechnologie**, des progrès importants ont été obtenus par l'emploi de méthodes relevant de la simulation au niveau moléculaire en particulier.

Des champs d'application entièrement nouveaux sont donc en train de s'ouvrir depuis quelques années.

Le domaine de la conception de médicaments est un bon exemple de ce phénomène. En effet la simulation numérique permet de remplacer dans certains cas une expérimentation in vivo par une expérimentation in silico et réduire ainsi les temps et les coûts de conception. Par ailleurs l'usage d'ordinateurs très performants rend possible l'analyse de quantités considérables de données tant génétiques que cliniques permettant par exemple l'extraction de connaissances pharmaco-génomiques. Les méthodes développées facilitent en outre l'analyse de la personnalisation des traitements et la prise en compte de pathologies complexes comme celles qui apparaissent au sein de populations vieillissantes.

Au-delà, les secteurs de la conception de produits **cosmétiques** et **agroalimentaires** bénéficieront largement des progrès obtenus pour modéliser la matière molle.

Le domaine du **Multimédia** devient de plus en plus, lui aussi, un domaine privilégié de l'emploi de la haute performance dès lors que les images, les films, les sons, les jeux sont devenus des objets numériques. Ainsi le calcul intensif permet notamment dans un temps raisonnable, l'amélioration du rendu naturel de scènes artificielles et d'éviter aussi les erreurs de conception concernant par exemple les effets d'éclairage de ces scènes.

De même la simulation des **ensembles urbains** tant du point de vue de leur conception que celui que celui de l'analyse de la pollution, du trafic ou encore de l'énergie constitue un champ prometteur d'application du calcul intensif.

Mentionnons aussi l'analyse des effets de catastrophes naturelles (inondations, feux de forêts, raz de marée, …) et plus généralement l'impact sur l'**environnement** de processus naturels ou artificiels.

Remarquons enfin qu'au travers du fonctionnement de l'**Internet** de nouvelles utilisations du calcul à haute performance apparaissent. Ainsi en est-il de l'analyse de marché en se fondant sur l'étude de quantités considérables de données obtenues à partir du comportement des internautes derrière un écran ou encore à l'aide de capteurs divers et variés connectés tel que le RFID ou les technologies de type NFC (processus **Big Data**).

1.2.2. Un nombre croissant d'acteurs et des enjeux d'adaptation majeurs

En ce qui concerne la nature des entreprises qui utilisent les méthodes de simulation, remarquons que les grandes entreprises prédominent dans les secteurs classiques de l'Industrie (automobile, aéronautique, énergie, …).
Ceci est lié à l'envergure souvent mondiale de leur positionnement et donc à la nécessité de maintenir une position concurrentielle forte ainsi qu'à leur capacité à la fois d'investissement en matériel et logiciel et de recrutement d'ingénieurs à haute compétence.
Il est cependant important de souligner que ces grandes entreprises entrainent dans leur sillage fournisseurs et sous-traitants pour de plus en plus partager avec eux maquettes numériques et modèles de simulation afin d'intégrer rapidement dans leur processus de conception numérique les produits et services de leurs fournisseurs.

Dans les nouveaux domaines du calcul intensif, les besoins sont souvent le fait de PME innovantes qui sont les pionnières de ces nouveaux usages. Il devient pour elles de plus en plus difficile d'obtenir un accès aisé à des moyens de simulation à des coûts adaptés ainsi que l'acquisition des compétences techniques nécessaires.

Du côté des vendeurs de progiciels, l'examen montre qu'ils sont positionnés pour l'essentiel dans la fourniture de solutions vers ce qui fait une grosse partie du marché : l'industrie manufacturière et l'énergie voire le monde de la finance.
Ces entreprises qui pour la plupart sont des entreprises de taille moyenne ou petite pour leur activités de simulation à haute performance, ont ou vont avoir un enjeu considérable d'investissement de R&D pour adapter ou même reconcevoir leurs produits en fonction des architectures d'ordinateurs à parallélisme massif (voir chapitre 2).
A nouveau l'accès aisé à des moyens de calcul intensif à des coûts adaptés ainsi que le recrutement de compétences particulières vont constituer aussi des enjeux majeurs pour ces entreprises en plus de leur capacité à réaliser les investissements financiers nécessaires.

Remarquons enfin que le domaine dit du **Big Data** s'ouvrant de plus en plus à l'usage des techniques et des moyens de calcul intensif, il est très probable que les grands acteurs mondiaux des logiciels de gestion des entreprises, deviennent aussi des acteurs de la haute performance.

1.2.3. Une diversification grandissante des méthodes et modèles de la simulation

L'extension considérable des domaines d'application de la simulation à haute performance est sous tendue par une évolution des méthodes et des modèles numériques. A l'inverse l'accroissement de la variété des modèles et des méthodes, couplé à l'emploi d'ordinateurs de plus en plus puissants permet d'élargir les secteurs d'activités ainsi que les formes d'utilisation de la simulation.

La liste suivante rappelle des évolutions majeures à prendre en compte.

- Une meilleure compréhension des comportements physiques des objets étudiés et prise en compte globale des grands systèmes et des systèmes de systèmes: simulation multi-physique, multi-échelle, multi-temporelle, multidisciplinaire, …

- La coexistence, la cohérence, l'intégration de paradigmes multiples tant continus que discrets pour représenter numériquement un objet ou système complexe sous diverses facettes ; ce qui conduit naturellement à l'édification de plates-formes permettant d'intégrer ces différentes vues et les traitements afférents, la standardisation de ces plates-formes devient alors nécessaire,

- La maîtrise du passage à l'échelle des algorithmes (précision, propagation d'erreurs, flux et gestion des données, …,

- L'introduction de nouvelles classes de modèles probabilistes permettant de traiter tous les phénomènes non déterministes (par exemple comportement humain, données climatiques, …) et la conception d'algorithmes reposant sur des méthodes probabilistes (optimisation génétique par exemple)

- Le développement de domaines plus récents en matière de modélisation comme ceux des matériaux, de la matière molle, de la simulation moléculaire ou encore de la conception d'images numériques réalistes au-delà de domaines classiques de la physique comme la combustion, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, l'acoustique, …,

- Le développement de techniques de réduction de modèle pour faire face au besoin de puissance de calcul considérable nécessaire pour analyser toutes les voies possibles de phénomènes complexes ou pour être en mesure d'étudier le couplage et les interactions de plusieurs de phénomènes,

- L'exploration de grandes masses de données (Big Data) , l'élaboration de nouvelles méthodes de modélisation résultant d'un apprentissage statistique obtenu à partir de données collectées via internet (data-driven modeling) ; par ailleurs remarquons que le mode « map-reduce » de parallélisme usuellement employé par les grands acteurs du Big Data (Google par exemple) est par trop simplifié pour traiter de manière plus pertinente de grandes masses de données, et devra ainsi évoluer vers le modèle de parallélisme employé usuellement par les acteurs du calcul intensif et qui est plus général,

- La mise au point d'une Algorithmique Parallèle entièrement nouvelle et associés aux futures architectures d'ordinateurs reposant sur l'usage d'un parallélisme

massif et de processeurs hybrides, exploitant de façon efficace la mémoire et économe en énergie.

1.2.4. Un marché en croissance sur l'ensemble de ses secteurs

Les éléments énoncés dans les paragraphes précédents et qui insistent sur la dynamique d'évolution de la simulation à haute performance, sont confirmés par les chiffres fournis par l'analyste IDC pour l'ensemble du marché mondial.

The Broader HPC Market Growth to 2016							
HPC Compute, Storage, Middleware, Application and Service Revenues, 2011 -- 2016 ($M							
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	CAGR (11-16)
Server	10,300	11,031	11,910	12,778	13,839	14,621	7.3%
Storage	3,664	3,992	4,350	4,739	5,163	5,625	8.9%
Middleware	1,147	1,233	1,326	1,426	1,534	1,650	7.5%
Applications	3,370	3,618	3,884	4,169	4,475	4,804	7.3%
Service	1,801	1,924	2,056	2,197	2,348	2,509	6.9%
Total	20,282	21,799	23,526	25,310	27,359	29,209	7.6%
Source: IDC 2012							

2. L'environnement technologique

2.1. Tendances

2.1.1. La prise en compte de ruptures radicales qui anticipent l'évolution de l'ensemble de l'informatique

Pendant une longue période, la progression des usages et applications de l'informatique a été stimulée par un doublement de la puissance de traitement tous les deux ans. Pendant cette période, les gains principaux reposaient sur l'augmentation de fréquence des circuits intégrés rendant ainsi transparente aux logiciels l'accélération des traitements.

Dans l'avenir, l'évolution de la puissance de calcul et son utilisation efficace ne pourront pas se déduire d'une simple extrapolation des solutions qui ont prévalues dans le passé mais nécessiteront des ruptures technologiques majeures.
Ainsi l'atteinte d'une puissance de 100 Teraflops d'abord, puis de 1 Petaflops plus récemment, ont montré l'importance de recourir sous diverses formes, au parallélisme massif.
En ce qui concerne la prochaine génération de supercalculateurs, celle de l'Exascale, c'est-à-dire celle capable de délivrer une puissance d'1 Exaflop (1 Milliard de milliards d'opérations arithmétiques par seconde) de nombreux verrous technologiques subsistent.

La levée de ces verrous va demander la mise en œuvre de solutions radicalement différentes de celles du passé.
Pour les producteurs de technologies matérielles dans un premier temps et logicielles ensuite, ces ruptures vont être à même de remettre en cause le positionnement actuels des acteurs mondiaux voire en faire naître de nouveaux.

La capacité de saisir les opportunités correspondantes devient donc un facteur clef de la compétitivité future de ces acteurs et de maîtrise en Europe et en France des techniques associées.

Par le passé, le mûrissement des technologies informatiques et l'apparition de standards de fait ont permis de rendre indépendantes les évolutions du matériel et du logiciel.
Pour les années à venir et compte tenu des inconnues qui pèsent sur les différentes voies d'accroissement des performances, cette indépendance sera remise en cause.
Pour les utilisateurs et les éditeurs de progiciels, cela signifie que sauf à perdre en compétitivité, il leur faut pouvoir comprendre en avance de leur mise sur le marché, les évolutions des choix d'architecture et anticiper leur intégration dans le développement de leurs produits ou applications futures.

A l'inverse, pour le concepteurs d'ordinateurs ou de logiciels de base, intégrer les besoins spécifiques à certains types d'applications est une voie potentielle de gains de performances par la spécialisation de certains composants, ou la prise en compte privilégiée de certains paramètres critiques.
Une approche dite de « Co-conception » devient alors un facteur d'accélération de la mise au point de solutions qui profite simultanément aux producteurs de technologies et à leurs utilisateurs.

Remarquons enfin que les ruptures auxquelles sont confrontées les utilisateurs et concepteurs de systèmes à haute performances vont gagner peu à peu l'ensemble de l'industrie de l'Informatique et du Numérique.

Les solutions et compétences développées pour le calcul intensif seront alors à même de profiter à l'ensemble du marché.

2.1.2. L'ancrage de la simulation dans le monde du réel.

Le développement d'Internet a mis l'accent sur trois grandes tendances :

- un accroissement significatif des débits réseau et une standardisation des connexions,
- une dissémination d'objets communicants générateurs de quantités de données de plus en plus importantes,
- une concentration importante de la puissance de calcul au sein de centres informatiques de données et de calcul.

Ces évolutions sont importantes car elles permettront une inclusion efficace de la simulation dans le monde du réel.

Si l'on considère le cas des simulations de phénomènes naturels et de prévention des catastrophes, il faut non seulement augmenter la précision des simulations mais aussi disposer d'une infrastructure adaptée de capteurs multiples connectés à des réseaux à haut débit.
Sont mis alors à disposition des moyens permettraient d'alerter de façon ciblée et en temps utile, autorités et populations concernées par les conséquences du phénomène observé.

Il en de même dans des applications de la télémédecine, de l'optimisation de chaines logistiques ou encore de la gestion de l'énergie (smartgrids).

La concentration de la puissance de calcul couplée à un réseau d'accès efficace est un moyen d'accélérer les prises de décision en disposant d'une meilleure connaissance des conséquences liées à la décision choisie.
Cette accélération peut être vitale comme dans le cas de catastrophes naturelles, ou apporter une amélioration importante de compétitivité.

2.1.3. La multiplication des processeurs

La loi de Moore s'est traduite pendant trente ans par une augmentation exponentielle de la fréquence d'horloge des processeurs.
La miniaturisation continue a entrainé un accroissement du nombre de transistors à surface constante de circuit intégré, et ce gain de transistors a longtemps été utilisé pour complexifier le processeur afin d'en augmenter la fréquence de fonctionnement.
Dès lors les augmentations de fréquence d'horloge et la complexification du processeur ont permis aux applications séquentielles de s'exécuter beaucoup plus vite sans qu'aucune modification des programmes ne soit nécessaire.

Cependant cette augmentation de performance se traduisant par une élévation exponentielle

de la quantité de chaleur à dissiper, les fabricants de processeurs ont été amenés au début des années 2000, à rechercher un moyen de maitriser l'énergie thermique émise ce qui a conduit à une stagnation de la fréquence des processeurs.
Le budget de transistors d'un circuit intégré continuant de croître selon la loi de Moore, ce budget a été utilisé pour augmenter le nombre de processeurs de calcul (ou cœurs) résidents sur un circuit intégré.

Jusque dans les années 80, les super-ordinateurs ne comportaient que quelques processeurs. Le nombre a ensuite rapidement augmenté à quelques milliers dans les années 90, quelques dizaines de milliers dans les années 2000.
A la fin de 2012, le super-ordinateur le plus puissant du monde comprend désormais plus de 500 000 processeurs.
En général ces processeurs sont regroupés de manière hiérarchique au sein de l'architecture d'un ordinateur. On en compte plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines au sein d'un circuit intégré, un certain nombre de ces circuits sont regroupés au sein d'un serveur pour former ce qu'on appelle un nœud de calcul, ces nœuds de calcul sont connectés entre eux par des réseaux extrêmement rapides pour former un supercalculateur.
La façon de gagner en performance pour une application consiste alors à pouvoir répartir à tout moment ses opérations sur un nombre le plus important possible de processeurs afin de pouvoir exécuter en parallèle ces opérations. C'est donc la quantité de parallélisme qu'un algorithme et le programme qui le met en œuvre peuvent présenter qui devient un gage de l'augmentation de performance.
Ceci est une **vraie révolution dans le monde l'informatique.**

2.1.4. Hybridation et processeurs spécialisés

A priori les opérations encore appelées les tâches qu'un programme doit effectuer en parallèle sont quelconques et ne dépendent que de l'application visée. Ceci nécessite donc de disposer de processeurs universels pour pouvoir réaliser n'importe laquelle de ces tâches.

Le gain lié à ce parallélisme est cependant limité par la proportion d'opérations, instructions qui s'exécutent séquentiellement (loi d'Amdhal).
Ce constat conduit à rechercher d'autre forme de parallélisme notamment celui qui peut être associé au traitement simultané des diverses composantes d'une donnée. Ceci amène à considérer au sein des ordinateurs l'intégration de coprocesseurs capables de réaliser la même opération sur tous les éléments d'une donnée simultanément. Le remplacement de plusieurs instructions séquentielles par une seule réduit alors significativement le temps nécessaire pour certaines opérations, notamment en ce qui concerne le traitement vectoriel.

Le super-ordinateur le plus puissant actuellement utilise en complément des processeurs universels de calcul, un nombre équivalent de processeurs graphiques (GPUs) qui permettent d'accélérer le traitement vectoriel. Cependant l'offre programmatique associée (bibliothèque logicielle Compute Unified Device Architecture CUDA) est encore de trop bas niveau et représente un frein à l'utilisation généralisée de ce type de solutions par les éditeurs de progiciels.
A fin 2012, le nombre d'ordinateurs employant des processeurs graphiques est de 12% de l'échantillon représentatif du Top 500 (http://www.top500.org) et ce nombre reste en progression modérée.

De nouveaux concepts sont en cours d'émergence dans ce domaine, ils devraient conduire à

des solutions plus efficaces et faciles à mettre en œuvre.

L'usage d'architectures hybrides, c'est à dire composées de processeurs universels couplés à des processeurs spécialisés est certainement une voie essentielle à considérer pour gagner en performance.

2.1.5. L'Evolution des environnements de programmation et de l'algorithmique

Les architectures multi-cœurs nécessitent une réécriture des logiciels pour tirer profit des gains potentiels des différents niveaux de parallélisme.

La tendance générale du développement logiciel est de masquer la complexité du matériel sous-jacent au bénéfice d'une abstraction de plus en plus poussée. Cette facilitation de développement induit des surcoûts en terme de traitement et nuit à la performance globale.

Le recours à une programmation de "bas niveau" grâce à l'exposition plus directe des différents niveaux de parallélisme et de mémoire nécessite une plus grande expertise mais essaie de compenser l'incapacité des outils de compilation à s'adapter à des architectures matérielles complexes.

Les principaux inconvénients de la situation actuelle sont le coût d'adoption de nouvelles solutions de programmation et la non portabilité de ces solutions qui sont la plupart du temps « propriétaires ».

Ce dilemme conduit à une situation de blocage pour une utilisation industrielle des nouvelles solutions.

Seule l'apparition d'un standard de fait et/ou la réalisation de travaux de définition d'un standard permettront d'obtenir un compromis satisfaisant entre un niveau d'abstraction suffisamment bas pour intégrer les spécificités de l'architecture, obtenir des performances élevées, garantir une bonne portabilité du code et une disponibilité des compétences nécessaires dans la communauté des développeurs.

Les améliorations de performances ne résulteront pas simplement d'une plus grande distribution de calculs indépendants.
Un gain de productivité conséquent devra également être obtenu grâce à la prise en compte d'architectures parallèles dès la conception des algorithmes puis par l'emploi de méthodes, langages, environnements de programmation et de mise au point des programmes adaptés.

Par ailleurs un soin particulier devra être apporté dans le futur à l'optimisation de la consommation d'énergie ainsi qu'à celle du nombre d'accès à la mémoire qui en général réside à cause de sa taille sur des circuits intégrés plus lents que ceux qui contiennent les processeurs.

2.1.6. Co-conception et standardisation

Les spécificités des problèmes traités et les besoins élevés de performance empêchent l'adoption de moyens génériques à même de traiter certaines classes de problèmes. Les nouvelles solutions apportées n'auront de sens que dans la mesure où les progrès réalisés se

traduiront au niveau des applications pratiques.

Maîtriser tous les aspects du calcul intensif requiert un travail par essence interdisciplinaire, reposant sur la connaissance d'un domaine applicatif et un savoir-faire en modélisation, simulation numérique et exploitation de l'outil informatique.

La Co-conception, collaboration étroite entre les développeurs de logiciels et les concepteurs de système permet de s'assurer de la concordance des intérêts des acteurs. Elle limite en outre le risque de réaliser des investissements dans des solutions performantes sur le plan technologiques mais non rentables du fait de l'insuffisance de débouchés.

La Co-conception devra permettre de prendre en compte le fait qu'un certain nombre de fonctionnalités seront déportées au niveau du matériel, ce qui va impliquer une définition nouvelle du logiciel de base.

La définition et la promotion de standards constituent un autre levier facilitant l'adoption d'innovations en particulier en termes d'architecture ou de modèle de programmation.
Les implications résultant de changements dans ces domaines sont particulièrement coûteuses. La standardisation plus que le niveau de performance en facilite l'adoption. Mais la multiplication des acteurs utilisant une technologie réduit d'autant le risque d'un investissement à fond perdu.

2.2. Enjeux technologiques de la haute performance

Les progrès dans le calcul intensif et en particulier la mise au point d'un ordinateur de la prochaine génération (1 Exaflop) nécessitent une prise en compte et un traitement de plus en plus efficace des questions de consommation énergétique, de parallélisme, de résilience des systèmes et de gestion des données, questions auxquelles sont associés autant de verrous technologiques.

2.2.1. Consommation énergétique

La consommation énergétique est devenue une composante majeure du coût de possession d'une infrastructure de calcul intensif.

La rentabilité des infrastructures implique de limiter à 20MW la consommation totale d'un centre informatique. On constate des différences de performance énergétique considérable entre les différents systèmes haute performance.

Les 29 systèmes les plus efficaces produisent plus de 2000 Mflops/W tandis le 39ème ne dépasse pas les 1000MFlops/W (megaflops par watt), le 413ème les 100MFlops/W et que le moins efficace des systèmes du Top 500 des ordinateurs les plus puissants se limite à 33MFlops/W.

Un système offrant une puissance de 1 ExaFlop devrait atteindre un niveau de performance énergétique de l'ordre de 100 000 Megaflops/W.

Cet objectif ne peut être atteint qu'en modifiant les architectures logicielles afin de minimiser les mouvements de données, la gigue des tâches (délai entre un événement et sa prise en compte par le système) et une expression plus complète et systématique du parallélisme.

L'utilisation de processeurs avec plusieurs cœurs d'exécution, conduit à intégrer un grand nombre d'unités de calcul au sein d'un même système, le plus souvent réparties sous la forme d'un ensemble de nœuds de calcul ou serveurs interconnectés. Un tel choix exige des compromis et des optimisations tant du point de vue de l'architecture matérielle (hiérarchie et cohérence des informations en mémoire) que de l'architecture logicielle (gestion du parallélisme, environnement d'exploitation et de développement).

2.2.2. Parallélisme

Les nouvelles architectures sont confrontées aux limites des modèles classiques de programmation parallèle et requièrent de nouveaux modèles et environnements de programmation associés permettant d'exploiter le grand nombre de cœurs, l'hétérogénéité des processeurs et la hiérarchie de la mémoire et du stockage.

Il est ainsi nécessaire d'exploiter un haut niveau de concomitance de tâches (communications asynchrones, recouvrement des phases de calcul et de communication), d'équilibrer dynamiquement la charge de calcul et les flux de données ainsi que de coordonner les tâches.

La généralisation des accélérateurs induit une spécialisation des algorithmes de traitement aux spécificités des processeurs tout en reposant sur un modèle de programmation faisant la distinction, par exemple, entre parallélisme de tâches et parallélisme de données.

Citons le fait que le Titan Xk7 la machine la plus puissante du Top 500 à fin 2012 dispose de plus de 500 000 processeurs dont près de la moitié sont des accélérateurs.

Ainsi par simple extrapolation linéaire, un ordinateur d'une puissance d' 1 Exaflop, nécessiterait l'emploi de 1'ordre de 260 Millions de cœurs de processeurs !

La programmation de telles architectures devient alors extrêmement complexe, car dès que le niveau de parallélisme devient élevé le comportement d'un programme devient tout à fait difficile à prévoir et analyser.

Il va falloir donc s'attendre à une baisse drastique de la productivité en matière de programmation et un risque de sous-utilisation importante des ressources matérielles et donc de réduction des performances utiles.

La conception et l'utilisation de langages et d'environnements de programmation adaptés ainsi que d'outils de compilation et de débogage spécifiques devient alors une nécessité impérieuse.

De plus un effort particulier doit être entrepris pour disposer des algorithmes qui rendent possible une utilisation efficace d'un niveau élevé de parallélisme.

De ce point de vue, plusieurs alternatives doivent être explorées.
L'une peut être de disposer d'un très grand nombre de processeurs lents qui consomment donc moins d'énergie à condition de pouvoir exhiber le niveau de parallélisme nécessaire.
Une autre alternative est l'usage d'un nombre plus restreint de processeurs mais disposant chacun d'une fréquence d'exécution plus élevée.

2.2.3. Résilience

La miniaturisation à l'extrême, la complexification des circuits intégrés, la baisse des tensions, la réduction des latences, l'augmentation des interconnexions et l'accroissement des besoins en bande passante diminuent de manière très significative la tolérance aux perturbations électromagnétiques des ordinateurs et amplifie très significativement la probabilité d'erreurs.

De même l'augmentation très importante du nombre de composants accroît la probabilité de pannes au sein d'un système.

La tolérance à ces défaillances par la mise en œuvre de détection et correction dynamiques d'anomalies au niveau matériel et logiciel sera probablement un enjeu majeur dans les années à venir et pourra être optimisée via une coopération étroite entre les développeurs d'application et les concepteurs de systèmes d'ordinateurs en s'appuyant sur des dispositifs nouveaux relevant simultanément du logiciel et du matériel.

2.2.4. Archivage et accès aux données

La diminution tendancielle du délai d'accès à l'information sur les supports d'archivage ne sera pas suffisante pour atteindre les capacités de traitement attendues dans les systèmes Exaflops. La gestion de la localisation des données doit être considérablement améliorée en créant notamment à ce niveau une plus grande adhérence entre les couches logicielles et matérielles.

La séparation des couches des modèles standards de systèmes opératoires comme le modèle Posix communément employé induit par ailleurs un surcoût en temps intolérable dans le traitement des données, et ce modèle devra donc évoluer.

2.2.5. Pour des programmes de Recherche dédiés à l'atteinte de l'Exaflop et au-delà

Dans les paragraphes précédents ont été évoquées les principales ruptures dans l'architecture des ordinateurs qui vont être visibles des utilisateurs de ces futurs systèmes.

S'ajoutent à ces ruptures, de nombreuses évolutions radicales qui vont intervenir au plus profond des ordinateurs notamment au niveau des réseaux d'interconnexion ou celui des systèmes de refroidissement.

Compte tenu des enjeux il est fondamental les que les technologies qui conduisent à l'Exaflop soient maitrisées en France et en Europe et fassent l'objet d'un programme de R&D associé.

Il est remarquable de constater que les Etats Unis, le Japon et la Chine notamment ont lancé des programmes de cette envergure, il est tout aussi remarquable de s'apercevoir que les principaux concurrents non européens des entreprises Européennes qui utilisent de manière soutenue le calcul intensif sont aussi, pour la plupart situés dans ces pays…..

Comme l'atteinte d'objectifs ambitieux en matière de puissance de calcul fait progresser les

technologies et les usages, on peut légitimement penser que les entreprises Américaines, Japonaises ou Chinoises pourront bénéficier, en avance de phase, des progrès réalisés sur leur sol.

Notons cependant que l'atteinte de puissances de calcul de plus en plus élevées va conduire à des remises en cause très profondes des principes mêmes sur lesquels repose l'informatique depuis de nombreuses années.

Le recours à une algorithmique probabiliste plutôt qu'à une algorithmique exacte voir à du calcul quantique, le recours à d'autres matériaux que ceux issus de l'électronique dont ceux du vivant font partie des voies qu'il convient d'explorer et pour lesquelles il devient important **de lancer des programmes de recherche fondamentale**.

3. Les voies du développement en France de la simulation à haute performance

L'impact économique de la simulation haute performance dans des secteurs de plus en plus variés de l'Industrie corrélé à la maîtrise des ruptures technologiques en cours au sein de l'architecture des ordinateurs plaide pour la mise en œuvre en France d'un programme de développement ambitieux.

Ce programme doit s'appuyer sur l'existence en France **d'un éventail de compétences** et de positions industrielles **unique** en Europe et qui n'existe que dans de rares pays dans le monde : les Etats Unis, le Japon et la Chine qui s'est lancée dans la course à la puissance de calcul.

3.1. Du matériel aux applications : une situation exceptionnelle en France

La France est un des rares pays dans le monde à disposer sur son sol d'acteurs qui couvrent une très grande partie de la chaîne de valeur de la simulation numérique.

Cette chaîne va des concepteurs de matériels à des grands utilisateurs pionniers en passant par la conception et la vente d'applications.

Elle s'appuie par ailleurs sur une recherche technologique au meilleur niveau mondial et une structuration nationale de la recherche et développement qui, par les Pôles de Compétitivité, doit permettre une diffusion plus rapide et plus large de l'usage de la simulation à haute performance.

La liste ci-dessous décrit de manière non exhaustive les acteurs opérant sur le territoire national.

- Des acteurs de premier plan de la recherche technologique:
    - Le CEA qui couvre un spectre large qui va des composants et des architectures matérielles aux applications les plus diverses,
    - Pour le développement d'applications : le CERFACS, ainsi que des centres métiers comme l'ONERA, l'IFP, le CSTB, le CETIM, … ou encore des écoles d'ingénieurs comme celles relevant de l'Institut Mines –Telecom ou de l'IFFSTAR (Ponts et Chaussées), ….

- Des équipes avancées au sein de laboratoires relevant du CNRS, de l'INRIA ou des Universités en matière d'algorithmique, de mathématiques appliquées ou d'environnements de programmation,

- Des grands industriels utilisateurs :
    - Aéronautique : EADS, Dassault Aviation, Safran, …
    - Transport : PSA, Renault, Michelin, Valeo, Alstom, …
    - Energie : EDF, CGG, Schlumberger, Total, …
    - Chimie : Air Liquide, Arkema,..
    - BTP : Bouygues, Vinci,….
    - Santé : Sanofi, Loreal…
    - Grandes Banques
    - …
- Des industriels de référence, producteurs de technologie :
    - Matériel : Bull seul constructeur Informatique européen,
    - Matériel Kalray (PME) : concepteur de processeurs à parallélisme massif,
    - Intégrateur de solutions : Silkan (PME), …
    - Environnement de programmation : Caps Entreprise (PME), …
    - Logiciels d'application :
        - Dassault Systèmes leader mondial des logiciels de PLM ,
        - ESI leader mondial du prototypage virtuel (ETI),
        - une partie de la R&D d'entreprises américaines comme Altair, Ansys qui ont racheté des PME françaises,
        - des PME innovantes comme Distene, Numtech, Scilab-Enterprises, Eurodécision,…
- Des offres de « cloud computing » dédiées au calcul intensif : Extreme Computing de Bull, l'initiative Numinov, l'offre d'OVH,
- Des entreprises de Service et de conseil en technologie : Altran, Alten, Sogeti High Tech, C-S …,
- Une structuration du soutien à l'innovation qui favorise la création d'éco-systèmes :
    - Principaux Pôles de Compétitivité concernés : Systematic, Advancity, Aerospace Valley, Cap Digital, Minalogic, Images et Réseaux, Astech, Moveo, Medicen, … et l'IRT SystemX.
    - Teratec est une structure sans équivalent, regroupant dans une technopole dédiée à la simulation à haute performance des grands moyens de calcul, des laboratoires partenariaux Industrie Recherche (Intel y a installé son laboratoire Européen pour l'Exascale en coopération avec le l'UVSQ, le CEA et GENCI), des offreurs de service, de la formation de haut niveau, et une pépinière d'entreprises. Conçue en association entre quelques grands industriels et le CEA, Teratec a la capacité de jouer un rôle moteur dans la mise en œuvre des recommandations de ce rapport.

3.2. Un programme d'accélération de l'usage de la simulation à haute performance

Afin de tirer parti systématiquement des avantages compétitifs que procure la simulation à haute performance, un plan ambitieux doit être mis en place pour accélérer son usage tout en prenant en compte les évolutions des technologies du traitement informatique. Les éléments de programme doivent être déclinés selon deux axes : **ANTICIPER et DIFFUSER**.

3.2.1. Anticiper

Il s'agit ici de mettre en place les programmes partenariaux de R&D qui doivent permettre d'améliorer les méthodes de simulation, les étendre à de nouveaux usages ou nouveaux secteurs d'activités et prendre en compte l'évolution des architectures d'ordinateurs vers un parallélisme massif faisant appel ou non à des processeurs spécialisés.

- **Améliorer les méthodes de simulation existantes et en mettre au point de nouvelles.**

On trouve au paragraphe **1.2.3** une liste des évolutions sur lesquelles il convient d'investir pour accroître la diversification de l'usage de la simulation ainsi que son utilité et sa pertinence.

En ce qui concerne le développement de méthodes fondées sur une représentation globale du système à concevoir et qui soit donc multi paradigmes, il est tout à fait souhaitable que puisse émerger des plates-formes ayant vocation à servir de standard. Chaque industriel pouvant ensuite personnaliser sa plateforme en y ajoutant ses propres différentiateurs.

En matière d'algorithmique à parallélisme massif, il est nécessaire que l'étude de l'implantation efficace de ces algorithmes et la problématique de consommation d'énergie soit aussi abordée en absolue coopération notamment avec les producteurs des technologies concernées (langages, environnements de programmation, processeurs, architecture de systèmes).

- **Faciliter la diversification des domaines d'application de la simulation et son usage par le plus grand nombre.**

Pour atteindre cet objectif, l'existence de bibliothèques numériques de calcul optimisées et facilement accessibles est un élément clef. Rappelons que dans des domaines comme la Cosmétologie par exemple, il n'existe sur le marché aucun code de calcul (dans ce contexte une approche « logiciels libres » est recommandée).

Trois types de bibliothèques doivent être envisagés :

- bibliothèques génériques, noyaux de calcul de référence, communes à tous les secteurs (algèbre linéaire, solveurs génériques, optimisation, analyse statistique, traitement du signal, visualisation, …)
- bibliothèques utiles à plusieurs métiers et spécifiques de certains secteurs de simulation, comme par exemple la simulation des matériaux, celle de la simulation moléculaire, …

- bibliothèques spécifiques à certains métiers comme ceux du multimédia, de la biologie, …

A nouveau les algorithmes employés devront prendre en compte le parallélisme massif des architectures d'ordinateurs, la consommation d'énergie voire comporter plusieurs instanciations en fonction de l'emploi de divers processeurs hybrides.

Pour compléter le dispositif de pénétration de la simulation dans de nouveaux métiers il serait utile pour un certain nombre de métiers retenus, d'inciter au développement d'applications témoins et si possible correspondant à un défi technologique.

- **Faciliter la programmation des architectures à parallélisme massif**

L'usage systématique d'ordinateurs à parallélisme massif requiert bien sûr des outils adaptés de productivité en matière de programmation et de mise au point de programmes.

Le parallélisme peut être multiforme: parallélisme de tâches, de données, parallélisme à grain fin, à gros grain, avec prise en compte d'accélérateurs spécifiques ….

Il va falloir donc pouvoir exprimer ces différentes formes de parallélisme au niveau des langages de programmation, disposer des environnements de programmation adéquats ainsi que des outils permettant de générer de manière optimale des implémentations spécifiques selon les différents types d'architectures présentes et futures.

C'est pourquoi la disponibilité d'outils de parallélisation si ce n'est complétement automatique mais pour le moins assistée par ordinateur, des programmes existants constitue un impératif.

3.2.2. Diffuser

Dans le développement d'un plan ambitieux de recours à la simulation haute performance comme facteur de compétitivité et ceci à l'échelle nationale, la question la plus sensible est celle du nombre d'entreprises, et notamment de PME et ETI, qui sont aujourd'hui en mesure d'intégrer la simulation numérique au sein de leurs processus de développement et de fourniture de produits et de services.

Il est donc impératif de mettre en place, plusieurs types d'actions à la fois pour promouvoir l'usage de la simulation et rendre cet usage concrètement accessible au plus grand nombre. Trois types d'actions peuvent être envisagés : **Promouvoir et Animer, Accéder et Former**.

3.2.2.1. Promouvoir et animer

Au niveau national, il est nécessaire de développer un programme d'information et de sensibilisation auprès des dirigeants des PME et ETI industrielles afin de leur faire prendre conscience des avantages des outils numériques et des conditions de leur mise en œuvre est nécessaire.

Les actions correspondantes pourront prendre la forme de livres blancs, d'articles de presse, de conférences ou encore d'organisation du partage de bonnes pratiques. Elles pourraient s'appuyer sur un recensement des différents acteurs de toute taille (utilisateurs, offreurs de

solutions) et leur mise en relation.

A l'image de que fait aux Etats Unis le « Council on Competitiveness » (www.compete.org) des enquêtes sur la progression des usages au sein des différentes filières industrielles ou catégories d'acteurs pourraient être développées pour donner lieu ensuite à des recommandations et actions spécifiques.

Le lancement et le suivi d'un programme volontariste plaide alors pour la mise en place à l'échelle nationale d'un **Centre National de Référence** associant les représentants des différents acteurs. La structure de ce centre national pourrait s'inspirer de ce qui a été fait en matière de promotion de l'usage des RFID (CNRFID, www.centrenational-rfid.com), ou encore en matière de santé et de soins à domicile (CNR Santé www.cnr-sante.fr).

Ce Centre devrait avoir aussi comme objectif d'animer un réseau de structures de référence qui sur le terrain auraient pour mission de permettre aux PME d'accéder concrètement aux bénéfices de la simulation ainsi qu'aux moyens du calcul intensif.

3.2.2.2. Accéder

Il s'agit ici de proposer des mesures permettant aux entreprises et aux PME en particulier qui pratiquent peu ou pas du tout la simulation de pouvoir le faire avec une barrière d'entrée très abaissée (en compétences et en coût) et ceci dans un contexte où il va être possible de disposer en France d'offre de services en mode « cloud » dédiés au calcul intensif.

Le dispositif proposé s'appuie sur les territoires qui présentent un potentiel important en matière de généralisation de l'usage du calcul intensif ou encore sur les pôles de compétitivité caractérisés par l'existence d'un écosystème adapté.

Il repose sur la labellisation par l'Etat après avis du Centre National de Référence d'une ou plusieurs **structures de référence régionales** (centres techniques, sociétés privées) qui disposent **d'ingénieurs compétents** pour délivrer de manière **contractuelle et professionnelle** une activité de conseil aux PME et ETI (stratégie d'utilisation de la simulation dans le métier de la PME ou de l'ETI et conseil en organisation, choix des types de logiciels et paramétrage de ceux-ci, …)

Le coût pour les PME de ces contrats de conseil doit être abaissé par des subventions versées à la structure de référence (voire à l'offreur de services Cloud), et dispensées soit par l'Etat soit par les collectivités territoriales.

Le modèle de financement peut être proche de celui utilisé par le programme Captronic (www.captronic.fr) pour diffuser l'usage des circuits intégrés..

L'activité de ces structures de référence est supervisée par le Centre National de référence.

Il convient de souligner que l'activité de conseil proposée ici est une activité de nature industrielle. Elle est différente de l'initiative intitulée HPC/PME créée au sein monde de la Recherche Publique (GENCI et INRIA avec le soutien d'OSEO) et qui correspond de fait au soutien de transferts de technologie des chercheurs vers les PME. Cette dernière initiative peut donc compléter le dispositif proposé en faveur des PME.

3.2.2.3. Former

La capacité de disposer en qualité et en quantité des compétences nécessaires à l'usage de la simulation à haute performance est un élément indispensable de son développement et ceci d'autant plus que les connaissances à acquérir sont multiples et s'appuient sur des domaines de plus en plus complexes qu'il s'agisse de la modélisation ou de l'architecture des systèmes informatiques à utiliser et programmer.

Il importe donc que **tous les grands centres de regroupement d'institutions universitaires ou d'enseignement** (PRES et successeurs) disposent d'une formation de Master qui soit consacré à la fois à la Modélisation mathématique à l'Informatique du calcul intensif.
Le Master MIPHS porté par l'Université de Versailles Saint Quentin en coopération avec l'Ecole Centrale Paris et l'ENS Cachan est un excellent exemple à suivre et à généraliser.
Il convient aussi de s'assurer que l'ensemble des cursus universitaires ou d'écoles d'ingénieurs à vocation technique comportent pour le moins un module d'initiation.
La formation continue pour les ingénieurs engagés dans la vie active est aussi un volet important à développer.

Les structures de référence décrites au paragraphe précédent pourraient aussi endosser ce rôle.

Le centre national de référence devra lui, s'assurer d'une bonne couverture du territoire national en matière de formation de tous types et pourrait se voir confier l'élaboration de cursus de référence.

4. Synthèse

Ce rapport résulte de la mission confiée par le Commissariat Général à l'Investissement (CGI) et la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS) - voir annexe 1- pour préciser les enjeux de la simulation numérique à haute performance et proposer des mesures visant à approfondir et renforcer l'usage de la simulation et du calcul intensif dans l'industrie et les services.

4.1. Rappel des arguments principaux de l'analyse

La simulation haute performance devient un élément clef d'amélioration de la productivité des entreprises en renforçant leur capacité d'innovation, tout en leur permettant de diminuer les coûts et les durées des processus industriels, d'augmenter la qualité globale et de former les compétences.

.

Longtemps confiné aux applications de l'industrie manufacturière classique, de l'énergie, de la défense, l'usage de la simulation se diversifie maintenant rapidement dans de nouveaux secteurs : santé, multimédia, technologies du vivant, urbanisme, finance, analyse de risque, environnement, analyse de marchés via des techniques « Big Data », ….

Le rôle croissant de la simulation à haute performance au sein des entreprises et la diversification de ses usages amènent à faire évoluer largement les méthodes de simulation vers des approches plus globales et plus systémiques tout en élargissant le nombre de domaines de modélisation et d'applications.

La pénétration des nouveaux secteurs susceptibles d'utiliser la simulation est pour l'essentiel portée, en matière d'offre, par des PME innovantes. En matière d'usage, les bénéfices de l'utilisation de la simulation doivent pouvoir être étendus au-delà des grandes entreprises, aux ETI et PME. Cependant pour ces dernières, la barrière d'entrée exprimée en termes de compétences humaines ou en termes de coût d'accès à la puissance informatique est élevée. Sur ce dernier point cependant l'existence d'offres de « cloud computing » dédiées à la haute performance va permettre de mutualiser les coûts du matériel et des produits logiciels et rendre, par un paiement à l'usage, accessible au plus grand nombre ces ressources.

En ce qui concerne l'évolution des technologies informatiques, les principes qui ont prévalu jusqu'à ces dernières années pour augmenter la puissance des ordinateurs sont très profondément remis en cause. L'usage du parallélisme massif pour gagner en performance constitue une rupture radicale qui oblige non seulement à revoir entièrement les logiciels

existants, mais aussi à concevoir systématiquement pour le futur, des algorithmes et des applications très parallélisées et donc à recourir à une programmation extrêmement complexe.

Les solutions envisagées pour faire évoluer la puissance actuelle des ordinateurs notamment vers l'Exaflop, repose sur la résolution de verrous technologiques majeurs et les voies pour y parvenir sont multiples. En particulier, la séparation traditionnelle qui s'est imposée au cours des années entre matériel et logiciel est à réexaminer fortement obligeant de plus en plus les entreprises à travailler en amont avec des fournisseurs de systèmes et de logiciels pour disposer en temps utile des applications qui leur sont stratégiques. De ce point de vue, l'existence en parallèle au programme qui est recommandé ici, d'actions de recherche sur les futures architectures d'ordinateurs est indispensable.

La diffusion de ces nouvelles possibilités, autorisées par l'évolution des méthodes de simulation et celle qui concerne les architectures d'ordinateur, est cependant freinée par la rareté des compétences humaines disponibles. En effet, le calcul intensif et la simulation étant des disciplines récentes, on fait face à un déficit de main d'œuvre qualifiée.

La France jouit d'une situation exceptionnelle en Europe et dans le Monde au sens où elle dispose sur son sol d'un ensemble d'acteurs de premier plan qui couvrent une très grande partie de la chaîne de valeurs de la simulation numérique. En effet, cette chaîne va du matériel (Bull est le seul constructeur informatique européen) jusqu'au logiciel et au service. Par ailleurs, elle s'appuie sur une recherche technologique de premier plan et sur des grands utilisateurs pionniers.

4.2. Quatre recommandations

Recommandation n°1.

Maintenir et renforcer l'avance française en matière de simulation en mettant en place les programmes de recherche pour améliorer et étendre à de nouveaux usages ou nouveaux secteurs d'application dans les entreprises, les méthodes de simulation.

Trois actions majeures de Recherche et Développement sont à considérer :

- l'amélioration des méthodes de simulation existantes et la mise au point de nouvelles s'appuyant sur une algorithmique prenant en compte le parallélisme massif;
- la construction de bibliothèques « métier » ou dédiées au traitement de certains types de modèles pour diversifier les domaines d'application de la simulation et son usage par le plus grand nombre;
- le développement des outils de programmation des architectures à parallélisme massif.

Ces actions devront privilégier des approches de co-conception entre producteurs de technologie et concepteurs d'application.

Recommandation n°2.

Au niveau national mettre en place un programme volontariste de développement de la simulation à haute performance tournée vers l'industrie. Ce programme devrait s'appuyer sur la création d'un Centre National de Référence de la Simulation associant les représentants des différents acteurs afin d'animer, coordonner et suivre la pénétration de la simulation haute performance dans le tissu industriel français.

La structure de ce centre national pourrait s'inspirer de ce qui a été fait en matière de promotion de l'usage des RFID (CNRFID, www.centrenational-rfid.com), ou encore en matière de santé et de soins à domicile (CNR Santé www.cnr-sante.fr).

Recommandation n°3.

Au niveau local permettre aux PME et ETI d'accéder concrètement aux bénéfices de la simulation et aux moyens de traitement informatique nécessaires.

Pour atteindre cet objectif il convient de disposer dans les territoires de structures de référence régionales, labellisées comme telles par l'Etat et le Centre National afin de fournir un service de conseil professionnel et contractualisé en matière d'usage de la simulation et d'accès au moyens de calcul à distance. Le coût pour les PME de ces contrats de conseil doit être abaissé par des subventions versées à la structure de référence (voire à l'offreur de services Cloud), et dispensées soit par l'Etat soit par les collectivités territoriales.

Le modèle de financement peut être proche de celui utilisé par le programme Captronic (www.captronic.fr) pour diffuser l'usage des circuits intégrés.

Recommandation n°4

Former pour pouvoir recruter en qualité et en quantité des compétences individuelles nécessaires à l'accroissement de l'usage de la simulation à haute performance.

Les grands centres de regroupement d'institutions universitaires ou d'enseignement (PRES et successeurs) doivent disposer d'une formation de Master qui soit consacrée à la fois à la Modélisation mathématique à l'Informatique du calcul intensif. Le Master MIPHS porté par l'Université de Versailles Saint Quentin en coopération avec l'Ecole Centrale Paris et l'ENS Cachan est un excellent exemple à suivre et à généraliser.

Il convient aussi de s'assurer que l'ensemble des cursus universitaires ou d'écoles d'ingénieurs à vocation technique comportent pour le moins un module d'initiation.

Le Centre national de référence devra lui, s'assurer d'une bonne couverture du territoire national en matière de formation de tous types et pourrait se voir confier l'élaboration de cursus de référence.

Annexe 1 : lettre de mission

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

DIRECTION GÉNÉRALE DE LA COMPÉTITIVITÉ,
DE L'INDUSTRIE ET DES SERVICES
LE DIRECTEUR GÉNÉRAL

COMMISSARIAT GÉNÉRAL À L'INVESTISSEMENT
LE COMMISSAIRE GÉNÉRAL ADJOINT

№ - 1519

Le 11 JAN. 2013

Monsieur le Président,

Les technologies du calcul intensif et de la simulation jouent un rôle critique pour l'innovation dans de nombreuses branches industrielles : énergie, aéronautique, santé, multimédia... Le développement et la maîtrise de ces technologies deviennent dès lors des sources de différenciation majeures pour les entreprises.

Vous avez bien voulu vous impliquer dans la mise en œuvre des investissements d'avenir, afin de renforcer le positionnement de l'industrie française, d'abord dans le domaine de l'informatique en nuage, puis dans celui du calcul intensif et de la simulation.

Dans le contexte des trois appels à projets lancés par le Fonds national pour la société numérique sur l'informatique en nuage, vous avez accepté de présider le comité d'experts chargé de l'évaluation des dossiers soumis. Les deux premiers appels ont abouti à la sélection de 9 projets, représentant un effort total de 131 M€ (dont 49 M€ apportés par les investissements d'avenir). Nous tenons à vous remercier pour votre contribution, essentielle à la bonne allocation des financements publics dans le cadre de ces appels.

S'agissant du calcul intensif et de la simulation, qui constituent un domaine stratégique pour nos filières industrielles, la maîtrise technologique par des acteurs de masse suffisante et des écosystèmes structurés est un enjeu de premier plan pour la capacité d'innovation des acteurs de l'industrie française.

C'est pourquoi nous vous confions la mission de proposer une feuille de route stratégique du domaine de la simulation.

À ce titre, vous lancerez une consultation auprès des principaux acteurs économiques du domaine, afin d'identifier les problématiques technologiques émergentes auxquelles ils sont confrontés. Cette consultation (qui pourra s'appuyer sur l'association Teratec que vous présidez) portera sur les aspects « système » liés au calcul intensif, ainsi que sur les développements logiciels et algorithmiques nécessaires pour maîtriser et tirer parti des prochaines générations d'ordinateurs. Sur la base de cette consultation, vous formulerez des propositions visant à rassembler des masses critiques au niveau technologique et à structurer les écosystèmes du secteur de la simulation.

Vous analyserez également les actions à mettre en place afin de favoriser la diffusion des technologies du calcul intensif vers les secteurs et filières applicatifs, traditionnels ou nouveaux. Vous interrogerez notamment les grands donneurs d'ordres industriels sur les manières de favoriser l'implication de leurs fournisseurs dans la simulation, et de créer et développer des entreprises technologiques dans leurs domaines d'activité.

Vous mènerez votre réflexion avec les principaux acteurs économiques du domaine et pourrez utilement vous appuyer sur les services de la direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services. Vous voudrez bien nous faire part de votre analyse pour le 30 mars prochain, avec un point d'étape le 15 février.

Nous vous prions de croire, Monsieur le président, à l'assurance de notre considération distinguée.

Pascal FAURE

Philippe BOUYOUX

Monsieur Gérard Roucairol
Président de Teratec
2, rue de la Piquetterie
91680 Bruyères-le-Châtel

Annexe 2 : entreprises consultées (grandes entreprises utilisatrices)

- Dassault-Aviation
  MM Jean Sass, Bruno Stoufflet

- EADS:
  Mr Jean Botti

- L'Oreal
  MM Jacques Playe, Bernard Querleux

- Renault
  MM Olivier Colmard, Jean-Marc David, Eric Landel, Eric Souchard

- Safran
  Mr Vincent Garnier

- Total
  MM Jean François Minster, Philippe Ricoux

Annexe 3 : Contributeurs

Claude Camozzi : consultant

William Jalby : Université de Versailles St Quentin

Hervé Mouren : Teratec

Christian Saguez : Académie des Technologies

Stéphane Valois : DGCIS