

## ANALYSE

### Les supercalculateurs, un impératif scientifique et industriel

*Les supercalculateurs actuels réalisent en un jour une tâche qu'un ordinateur de bureau mettrait 150 ans à accomplir. Leur puissance, traduite en opérations par seconde (flops), double presque chaque année – elle est, en 2010, de l'ordre de  $2 \cdot 10^{15}$  flops (ou 2 pétaflops). De nombreux domaines scientifiques et techniques, comme l'aéronautique, l'astrophysique, les matériaux, la chimie quantique, la santé, l'environnement, ou encore la fusion nucléaire, sont aujourd'hui dépendants des capacités de calcul intensif. Les supercalculateurs constituent donc un outil stratégique de compétitivité pour les États et les entreprises.*

*L'Europe et la France, qui s'étaient laissé distancer, ont consacré d'importants efforts depuis 2007 pour revenir dans la course mondiale. La mise en place d'une structure (GENCI), chargée de développer les moyens de calcul nationaux, a permis en 3 ans de multiplier par 30, en France, la puissance de calcul. Dans le cadre de l'initiative européenne PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe), un supercalculateur de 0,8 pétaflops est désormais opérationnel à Jülich en Allemagne et accessible à tous les scientifiques européens depuis le 1<sup>er</sup> juin 2010. La France devrait bénéficier prochainement de deux nouveaux outils : en 2010, pour ses besoins de défense, elle disposera de Tera 100 (puissance d'au moins 1 pétaflops) et en 2011 du Très Grand Centre de calcul (TGCC), d'une puissance supérieure à 1 pétaflops (dans le cadre de la participation à PRACE).*

*Ces outils au service de la défense, de la recherche et de la compétitivité industrielle demandent de l'Europe – seul échelon pertinent compte tenu de l'explosion des coûts – et de la France un engagement dans la durée pour accompagner le développement du calcul intensif et préparer les générations futures de supercalculateurs.*

**Proposition n° 1.** Garantir le développement du calcul intensif sur le moyen terme et conforter GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif) dans ses missions.

**Proposition n° 2.** Créer des formations qualifiantes en calcul intensif de la licence au doctorat.

**Proposition n° 3.** Soutenir le développement d'une industrie française et européenne des supercalculateurs dans le cadre du programme « Dépenses d'avenir ».

**Proposition n° 4.** À l'instar des États-Unis, favoriser l'émergence d'une infrastructure de recherche européenne d'envergure internationale et renforcer le processus d'innovation et de transfert en améliorant les relations public/privé pour faire de la France l'un des pivots du calcul intensif.

En juin 2010, le classement des 500 premiers supercalculateurs mondiaux (TOP 500) a été publié avec toujours une forte présence américaine mais surtout un bond significatif de la Chine. Actuellement, l'utilisation de la simulation et de la modélisation à l'aide de supercalculateurs s'est largement généralisée, et est devenue indispensable pour la recherche scientifique et l'innovation industrielle. Par ses capacités à accroître la précision et la finesse d'analyse des simulations numériques scientifiques et technologiques, la puissance de calcul des supercalculateurs démultiplie la capacité d'innovation des entreprises. Le développement des supercalculateurs va ainsi de pair avec des enjeux économiques, industriels ou gouvernementaux. Quant à la France, elle poursuit une forte progression en s'appuyant sur une politique centrée sur une synergie entre les secteurs de la défense, de la recherche et de l'industrie.

## Performances et enjeux associés au développement des supercalculateurs

### Qu'est-ce qu'un supercalculateur ?

Un supercalculateur ne se distingue d'un ordinateur ordinaire que par sa puissance : il est conçu pour réaliser les plus grandes performances possibles en vitesse de calcul, mémoire, puissance, etc. Les supercalculateurs actuels sont conçus autour d'une architecture parallèle, constituée, pour les plus puissants, de plusieurs centaines de milliers de processeurs qui peuvent tous concourir au traitement d'une même application. On parle de calcul haute performance (*High Performance Computing* - HPC).

**La performance d'un supercalculateur s'évalue usuellement en opérations en virgule flottante par seconde ou flops (*FL*oating point *O*perations *P*er *S*econd). Celle atteinte par les supercalculateurs actuels est de l'ordre du pétaflops ce qui correspond à un million de milliards ( $10^{15}$ ) d'opérations par seconde.** Un ordinateur de bureau ne réalise qu'un milliard d'opérations par seconde.

Atteindre des performances aussi élevées que celles du pétaflops, voire plus, exige des architectures hybrides<sup>1</sup>, associant des processeurs classiques (Intel, AMD...) avec des processeurs graphiques (Nvidia, AMD...), qui jouent le rôle d'accélérateurs<sup>2</sup>, ou encore des processeurs conçus pour des consoles de jeux tel Cell<sup>3</sup>. Ces architectures ont pour contrepartie une plus grande complexité de programmation. Seules quelques dizaines de spécialistes maîtrisent en France ce type de programmation.

Permettre aux applications d'utiliser pleinement ces nouvelles architectures et le nombre croissant de « cœurs » sur lesquels elles s'appuient demande un effort important dans le développement algorithmique et logiciel. La valeur ajoutée se déplace de plus en plus vers celui-ci. Pour Hewlett Packard, par exemple, le logiciel représente désormais plus des deux tiers des coûts de production. Dans ce contexte, l'*International Exascale Software Project*<sup>4</sup>, lancé fin 2008 aux États-Unis, et l'*European Exascale Software Initiative*, soumis fin 2009 pour financement à la Commission européenne, ont pour objectif **la conception des algorithmes et logiciels capables de répondre aux besoins des applications pour les futurs systèmes exaflops ( $10^{18}$  opérations par seconde), sachant que l'exaflops ne devrait être atteint qu'en 2020 d'après IBM, Cray ou Bull.**

### Évolution des supercalculateurs

En 1976, Seymour Cray conçoit le Cray I, premier supercalculateur d'une longue lignée qui va utiliser avec succès une architecture vectorielle. En 1982, le premier supercalculateur multiprocesseur appelé Cray X-MP est achevé, il demeurera le plus performant jusqu'en 1986 avec une capacité de 800 millions d'opérations par seconde et 189 exemplaires en seront construits jusqu'en 1988. De 1985 à 1989, le Cray II fut le supercalculateur le plus puissant avec 1,9 milliard d'opérations par seconde. Entre 2002 et 2004, NEC, toujours avec une architecture vectorielle, occupe la première place avec l'*Earth Simulator*.

C'est seulement vers la fin des années 1980 que la technique des systèmes massivement parallèles est développée, avec l'utilisation dans un même superordinateur de milliers de processeurs. De 2004 à 2008, IBM produit ainsi une série de supercalculateurs particulièrement performants passant du téraflops ( $10^{12}$ ) au pétaflops ( $10^{15}$ ). La barrière du pétaflops sera dépassée en 1998 par le *Roadrunner* d'IBM onze ans après le téraflops. Le *Jaguar* de Cray l'a rejoint récemment.

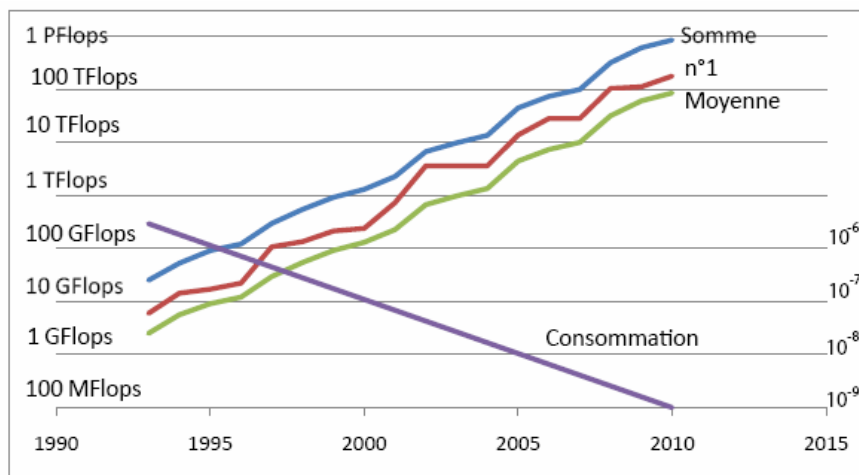
<sup>1</sup> *Revue de l'électricité et de l'électronique* (2009), dossier : « Le calcul à hautes performances : urgence scientifique, impératif industriel », n° 11.

<sup>2</sup> L'accélération matérielle consiste à confier une fonction spécifique à un processeur dédié qui effectuera cette fonction de façon plus efficace.

<sup>3</sup> Le Cell est un processeur conçu conjointement par IBM, Sony et Toshiba en février 2005. Il équipe notamment la console de jeu vidéo PlayStation 3 de Sony.

<sup>4</sup> [www.exascale.org/iesp/Main\\_Page](http://www.exascale.org/iesp/Main_Page).

Figure 1 : Évolutions de la performance et de la consommation par opération des supercalculateurs



- Évolution, de 1993 à 2010, de la capacité en opérations par seconde : (en vert, échelle de gauche) de la moyenne des dix plus puissants calculateurs, (en rouge), du plus puissant, enfin (en bleu) de la somme des dix plus puissants,
- Évolution de la consommation en joule par opération (en violet, échelle de droite)

Source : [www.top500.org](http://www.top500.org)

### Enjeux technologiques majeurs : la consommation d'énergie et la fiabilité

La mise en œuvre de milliers de processeurs en parallèle conduit à des consommations électriques très importantes, de l'ordre de **1 à 5 mégawatts pour les calculateurs les plus puissants** : leur bon fonctionnement est donc dépendant des systèmes de refroidissement. **La maîtrise de l'énergie dissipée est vraisemblablement le défi principal** auquel est confronté le développement des supercalculateurs. Ainsi, vouloir atteindre l'exaflops avec les technologies actuelles signifierait une puissance consommée proche du gigawatt. Il est donc indispensable de continuer à réduire la consommation par opération. Celle-ci est passée du microjoule par opération, au début des années 1990, au nanojoule aujourd'hui (*figure 1*).

Second défi, la fiabilité : la complexité croissante des supercalculateurs entraîne une réduction à quelques heures du temps moyen entre deux pannes de serveur. Ainsi, pour le *Roadrunner* de Los Alamos, l'un des 300 000 microprocesseurs qui le compose peut présenter une panne toutes les six heures. Il est donc impératif de maîtriser les technologies logicielles qui permettent de progresser dans l'exécution des calculs alors que des maintenances sont effectuées localement.

### Un vaste champ d'applications

**La simulation et l'analyse numériques** permettent de reproduire et de prévoir le comportement de systèmes complexes sous les contraintes les plus diverses, que ce soit à des fins scientifiques, industrielles ou financières. Ces simulations et analyses sont d'autant plus pertinentes que, par exemple, le maillage représentant une carlingue d'avion est fin, le nombre de variables entrant dans un process industriel est grand ou encore que le temps de calcul des conséquences d'un choix financier est court. La précision et la qualité de ces simulations sont directement dépendantes des capacités des calculateurs mis en œuvre et de la fidélité des logiciels de simulation. En outre, devant les difficultés ou les dangers à reproduire en grandeur réelle certaines situations, la simulation numérique devient le vecteur privilégié à l'analyse de risque. La complexité des modèles et la masse croissante de données à traiter vont de pair avec un accroissement considérable des puissances de calcul nécessaires.

L'essor de très nombreux domaines scientifiques et techniques est aujourd'hui totalement dépendant des moyens de calcul intensif associés : c'est le cas pour la **chimie quantique**, la **géophysique** (de la prévision des tremblements de terre à la prospection sismique pour les compagnies pétrolières), la **modélisation du climat ou des océans**, les **nanotechnologies**, la **biologie moléculaire** (l'étude du fonctionnement des cellules à l'échelle moléculaire) et **génomique**, les **images de synthèse** et la **réalité virtuelle**, la **physique des hautes énergies** et la **fusion nucléaire** (la simulation des écoulements pour la conception de sites de stockage de déchets, l'optimisation de la sécurité en matière de confinement électromagnétique dans le cas du projet ITER). De même, pour un État, maîtriser le calcul intensif est essentiel à sa sécurité, pour la **cryptologie** par exemple.



**Prédiction des sites actifs de protéines**

Bien qu'ayant identifié plusieurs millions de gènes, les scientifiques sont actuellement confrontés à la difficulté d'attribuer une fonction à la plus grande partie de ceux-ci. Pour pallier ce problème, une approche numérique a été développée consistant à prévoir la structure tridimensionnelle des protéines par modélisation moléculaire. Or, l'analyse d'une seule famille de protéines contenant quelques séquences nécessiterait plus de 3 000 heures de calcul, soit 125 jours, pour un PC standard. Les progrès dans ce domaine sont donc largement tributaires du calcul haute performance. À partir des résultats attendus, les chercheurs seront en mesure de constituer un véritable catalogue de signatures structurales spécifiques pour chacune des familles étudiées ce qui devrait permettre, entre autres, de découvrir de nouvelles activités enzymatiques.

**Les États-Unis encore en tête du TOP 500 mondial des supercalculateurs**

Le TOP500<sup>5</sup> dresse deux fois par an la liste des 500 supercalculateurs les plus puissants au monde, en précisant leurs caractéristiques et leur localisation. Pour répondre aux critères de développement durable est également apparue récemment une *Green 500 list*<sup>6</sup> qui trie les machines en fonction de leur performance énergétique.

**Figure 2 : Classement des 10 premiers supercalculateurs (conférence ISC de Hambourg, juin 2010)**

Système	Localisation	Puissance de calcul, en pétaflops	Puissance consommée, en mégawatt
Jaguar Cray XT5	ORNL, États-Unis 	1,8	6,9
Nebulae	NSC, Chine 	1,3	2,5
Roadrunner	Los Alamos, États-Unis 	1	2,3
Kraken Cray XT5	NICS, États-Unis 	0,8	3,5
Jugene Blue Gene/P	Jülich, Allemagne  	0,8	2,2
Pleiades	NASA, États-Unis 	0,7	3
NUDT Tianhe-1	Tianjin, Chine 	0,5	1,5.
BlueGene/L	LLNL, États-Unis 	0,47	2,3
Intrepid, IBM BlueGene/P	Univ. Texas, États-Unis 	0,45	1,2
Red Sky, SunBlade x6275	Sandia, États-Unis 	0,43	N.C.

Source : [www.top500.org](http://www.top500.org)

Sept des dix calculateurs les plus puissants sont implantés aux États-Unis (figure 2). Ces derniers disposent de 56 % de la puissance cumulée des 500 premiers supercalculateurs, soit 18 pétaflops sur 32. La plus forte progression récente dans la hiérarchie des puissances de calcul a été réalisée par la Chine. Elle occupe désormais la deuxième place. L'Europe (30 %) ne dispose actuellement que d'un seul supercalculateur proche du pétaflops, celui du FZJ au Centre de recherche de Jülich<sup>7</sup>. La machine la plus performante en France est passée de la 28<sup>e</sup> place en 2009 à la 18<sup>e</sup> place en 2010. En France et au Royaume-Uni, plus de la moitié des supercalculateurs appartiennent au secteur privé<sup>8</sup>. Enfin, il est à souligner qu'actuellement le CEA achève de développer avec Bull Tera 100, un supercalculateur pétaflopique. Tera 100 sera opérationnel d'ici la fin de l'année sur le site du CEA/DAM Défense.

Les microprocesseurs utilisés dans les supercalculateurs sont à 99 % nord-américains : Intel, suivi pour moins de 20 % par IBM/Power et AMD. C'est le cas de Tera 100 construit par Bull. L'Europe qui, avec le CEA et Bull, a démontré sa capacité à concevoir des machines de classe mondiale, reste

<sup>5</sup> [www.top500.org](http://www.top500.org).

<sup>6</sup> [www.green500.org](http://www.green500.org).

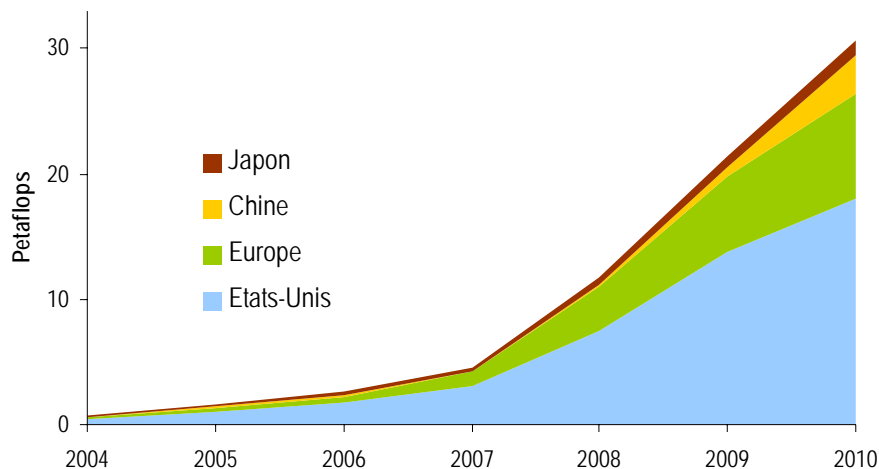
<sup>7</sup> Forschungszentrum Jülich (FZJ), situé près de Cologne. <http://www.fz-juelich.de/portal/home>.

<sup>8</sup> Bulletin d'information ORAP (2010), n° 62 : [www.irisa.fr/ORAP/Publications/Bi-orap/biorap-62.pdf](http://www.irisa.fr/ORAP/Publications/Bi-orap/biorap-62.pdf).

À la suite du rapport rédigé à leur demande par J.-L. Lions, le CEA, le CNRS et l'INRIA ont convenu, en 1994, de créer une structure de collaboration pour le développement et la diffusion du calcul parallèle : ORAP (ORganisation Associative du Parallélisme). L'objectif de cette organisation est le renforcement des collaborations entre les partenaires et la promotion des projets cohérents aux plans national, européen et international.

totallement dépendante d'approvisionnements extérieurs<sup>9</sup> en ce qui concerne le composant de base, le processeur. La Chine, en revanche, vient de s'affranchir de cette dépendance en construisant un supercalculateur de classe téraflops basé sur des processeurs Loongson 3A chinois<sup>10</sup>.

Figure 3 : Évolution de la puissance de calcul cumulée des 500 premiers supercalculateurs, par pays



Source : [www.top500.org](http://www.top500.org)

La figure 3 présente la répartition de la puissance de calcul par pays. On y constate la domination récurrente des États-Unis, la montée en puissance progressive de l'Europe et l'émergence ces dernières années de la Chine.

## Positionnement international et investissement en calcul intensif

### Un outil au service de l'innovation et de la compétitivité

Dès 2006<sup>11</sup>, une étude réalisée par International Data Corporation (IDC) prévoyait que la seule demande industrielle mondiale nécessiterait des capacités de calcul de l'ordre d'un million de milliards d'opérations par seconde en 2010. Selon une autre étude d'IDC, 97 % des entreprises ayant adopté le calcul intensif *via* des solutions *High Performance Computing* déclarent en dépendre totalement pour leur compétitivité. Le calcul intensif est désormais un outil d'aide à la conception, à la décision, au contrôle, indispensable pour la compétitivité et l'innovation des entreprises. Dans les années 1980, la société Boeing était amenée à construire et tester quelque 70 ailes d'avion pour valider la fiabilité d'un appareil. Aujourd'hui, grâce au calcul haute performance, Boeing n'a plus qu'à en tester en « réel » une dizaine<sup>12</sup>. Il s'agit d'un formidable gain de temps et de coût. **Un dollar investi dans l'utilisation du calcul haute performance dans l'armement américain produit une économie de 7 à 13 dollars**<sup>13</sup>. Dans le secteur bancaire, le calcul intensif est indispensable pour évaluer les produits dérivés, ou les risques financiers. Par exemple, la Société Générale et le Crédit Agricole disposent chacun d'un supercalculateur classé parmi les 500 premiers mondiaux. De même, des entreprises comme Total<sup>14</sup>, France Télécom ou EDF<sup>15</sup> se sont dotées de supercalculateurs figurant dans le Top 500.

L'utilisation du calcul intensif et l'accès aux machines les plus performantes sont en passe de devenir de véritables indicateurs de compétitivité et d'innovation allant de la R & D à la production.

<sup>9</sup> Suet P.-H., Loyer J.-L., Hamelin J. et Auverlot D. (2010), « Les microprocesseurs. Bâtir une stratégie industrielle européenne », *La Note de veille*, n° 174, Centre d'analyse stratégique, mai : [www.strategie.gouv.fr/article.php3?id\\_article=1167](http://www.strategie.gouv.fr/article.php3?id_article=1167).

<sup>10</sup> [www.bulletins-electroniques.com/actualites/63289.htm](http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/63289.htm)

<sup>11</sup> IDC juin 2006 WW HPC server market.

<sup>12</sup> Council of competitiveness (2009). *Case Study. Boeing catches a lift with High Performance Computing*.

<sup>13</sup> Department of Defense (2009), *Determining the value to the warfighter, A three-year return on investment study*, High Performance Computing Modernization Program.

<sup>14</sup> Total, dont les besoins prospectifs sont croissants, est non seulement très actif en calcul intensif mais possède un des supercalculateurs industriels les plus performants (49<sup>e</sup>) au niveau mondial. En effet, le coût d'une simulation est beaucoup moins élevé que celui d'un forage.

<sup>15</sup> EDF dispose du 58<sup>e</sup> meilleur supercalculateur mondial en juin 2010.

### *Une affirmation stratégique marquée aux États-Unis et en Chine*

**Aux États-Unis**, avec une vision stratégique à long terme, le gouvernement consacre pour la R & D en calcul haute performance environ **1,3 milliard de dollars par an** (hors National Security Agency), par l'intermédiaire de trois structures :

- l'agence pour les projets de recherche avancée de défense (DARPA<sup>16</sup>) au travers du projet *High Productivity Computing Systems* ;
- la National Science Foundation avec les directions « Computer & Information Science Engineering » et « Office for CyberInfrastructure » pour les infrastructures informatiques de la recherche ;
- le Department of Energy, avec le programme *Advanced Scientific Computing Research*.

Ces programmes participent, directement ou indirectement, au financement de la R & D des principaux constructeurs américains : Cray (250 millions de dollars en 2009), IBM (244 millions en 2009), etc. De plus, tout achat par un organisme d'État d'un supercalculateur doit être avalisé par le Congrès (*High Performance Computing Act*<sup>17</sup>), ce qui a pour effet d'inciter à l'achat de matériels américains, d'obliger les acquéreurs à anticiper 5 ans à l'avance le renouvellement de leur matériel, et de soumettre des appels d'offres communs. **Les États-Unis fournissent 95 % du marché mondial des grands ordinateurs alors qu'ils ne représentent que 30 % du marché.**

Par ailleurs, le projet *NASA Advanced Supercomputing* a pour ambition le développement d'une machine d'une puissance de **10 pétaflops d'ici à 2012**. Enfin, la National Science Foundation a annoncé l'installation en 2011, au National Center for Supercomputing Applications de l'université de l'Illinois, de la machine *Blue Waters*, d'une puissance d'environ 10 pétaflops, dédiée à la recherche académique et, en 2012, au Lawrence Livermore National Laboratory près de San Francisco, celle d'une machine de 20 pétaflops dénommée *Sequoia*. Ces deux machines, de conceptions différentes, seront construites par IBM. Le prix de *Blue Waters* serait de 208 millions d'euros.

#### **Le programme INCITE aux États-Unis : faciliter l'accès des industriels au calcul intensif**

Pour la 8<sup>e</sup> année consécutive, le programme *Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment* (INCITE), sous l'égide du Department of Energy, a récompensé les projets de simulation en calcul intensif les plus innovants. Le programme INCITE est ouvert aux chercheurs universitaires mais aussi aux industriels. Ceux-ci bénéficient d'une assistance particulière pour porter leurs codes sur les architectures parallèles des supercalculateurs et leur permettant ainsi d'accéder au calcul intensif.

En 2010, 23 millions d'heures processeurs<sup>18</sup> en moyenne pour chaque projet, des supercalculateurs de l'Oak Ridge National Laboratory et de l'Argonne National Laboratory, ont été allouées. Soixante-neuf projets ont été récompensés couvrant des domaines tels que les piles au lithium, les nanocellules solaires, le cycle du combustible nucléaire, la propulsion avancée, le séquençage de l'ADN, les supraconducteurs nanostructurés.

**La Chine** a pour ambition non seulement de **se doter de supercalculateurs mais de maîtriser l'ensemble de la chaîne technologique du processeur jusqu'à l'intégration des systèmes**. D'ores et déjà, une dizaine de supercalculateurs sont opérationnels. Trois des plus puissants ont été développés et intégrés en Chine par les sociétés Dawning, Lenovo et l'Université nationale de la Défense et, conformément au 11<sup>e</sup> Plan quinquennal, **le pétaflops a été atteint en 2010**. L'ensemble de ce programme bénéficie du retour en Chine de Steve Chen, l'architecte du Cray-YMP.

**Au Japon**<sup>19</sup>, qui fut l'un des pionniers du calcul intensif, le principal projet **NextGen** (anciennement Keisoku) devrait atteindre les **10 pétaflops en 2012**. Le gouvernement japonais y aurait investi de l'ordre de **820 millions d'euros sur 5 ans**. Il se situe dans la lignée de la réussite de l'*Earth Simulator* qui fut le supercalculateur le plus performant de 2002 à 2004. L'institut Riken est chargé de ce projet avec le soutien de Fujitsu.

#### *Le Projet PRACE : une ambition européenne*

Au niveau européen, le projet PRACE<sup>20</sup> (*Partnership for Advanced Computing in Europe*), lancé le 1<sup>er</sup> janvier 2008, avec 18 membres signataires, a pour ambition de permettre aux scientifiques européens d'utiliser des systèmes de simulation et de modélisation parmi les plus évolués au niveau mondial. Il est basé sur des partenariats transnationaux et des échanges interdisciplinaires. **Le budget de PRACE,**

<sup>16</sup> Defense Advanced Research Projects Agency.

<sup>17</sup> *High Perf. Comp. Act* 1991/1993/2007 [www.nitrd.gov/congressional/laws/102-194.pdf](http://www.nitrd.gov/congressional/laws/102-194.pdf).

<sup>18</sup> Heures processeurs : nombre d'heures multiplié par le nombre de processeurs.

<sup>19</sup> Rapport de mission « Supercalculateurs au Japon », 2007 ; [www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm07\\_046.htm](http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm07_046.htm).

pour cette première phase 2008/2010, fut de 20 millions d'euros, dont 10 au titre du 7<sup>e</sup> PCRD (Programme-cadre de recherche et développement technologique).

L'initiative PRACE a pour objectif de **préparer le déploiement en Europe, à partir de 2010, d'une infrastructure de calcul intensif de classe mondiale composée de centres équipés de supercalculateurs d'une puissance supérieure ou égale au pétaflops**, évoluant pour rester en permanence dans les quatre premiers mondiaux. Les partenaires principaux de PRACE prennent deux engagements :

- apporter un financement à l'infrastructure, à hauteur de 25 millions d'euros par an environ sur la période 2010-2015 ;
- recevoir, installer et opérer sur leur territoire national un des supercalculateurs de cette infrastructure, selon un calendrier convenu par les partenaires principaux.

### Une nouvelle dynamique française en adéquation avec cette ambition européenne

**La France est particulièrement concernée** par le calcul intensif. D'abord parce qu'avec la fin des essais nucléaires, la simulation, qui fait appel aux supercalculateurs les plus puissants, reste la **seule voie pour concevoir et améliorer les composantes de la force de frappe**. Ensuite parce qu'avec Bull, nous avons la chance d'abriter la **seule société européenne capable de concevoir et de déployer des supercalculateurs**. La nouvelle dynamique européenne qu'il nous faut construire reposera sur un **réseau de supercalculateurs régionaux et nationaux**, auquel il faudra continuer à porter la plus grande attention, et de « super-supercalculateurs », **les plus puissants**, qui devront désormais **résulter d'une coopération et d'un engagement européens**.

#### *La politique publique française en calcul haute performance*

Le dispositif de calcul pour la recherche scientifique en France est basé sur la complémentarité de trois niveaux d'équipements :

- Les trois centres nationaux, dont les équipements évoluent sous la responsabilité de GENCI : le CCRT<sup>21</sup>, le CINES<sup>22</sup> et l'IDRIS<sup>23</sup>, chacun d'une puissance de l'ordre de 100 téraflops ;
- les mésocentres : une vingtaine de centres intermédiaires de calcul régional, mis en place dans les grandes universités et des centres thématiques (physique, génomique), d'une puissance de l'ordre de 10 téraflops ;
- des équipements mi-lourds dans les laboratoires d'une puissance de l'ordre de 1 téraflops ;

Au niveau national, différents centres privés disposent de supercalculateurs : Dassault, EADS, EDF, SNECMA<sup>24</sup>, Thales, Total, etc.

#### **Tera 100, un nouveau supercalculateur disposant d'une puissance potentielle de 1,25 pétaflops**

Le supercalculateur Tera 100, implanté à Bruyères-le-Châtel, devrait être capable à terme de traiter plus d'un million de milliards d'opérations à la seconde, grâce à sa puissance de 1,25 pétaflops. Ce supercalculateur Bull sera utilisé, entre autres, par le CEA/DAM, dans le cadre de son programme SIMULATION, mis en place pour pallier l'absence d'essais nucléaires réels. Le Tera 100 est constitué de 4 300 nouveaux serveurs Bullx<sup>25</sup> Serie S, qui intègrent quelque 140 000 cœurs Intel Xeon série 7500. Il embarque 300 téraoctets de mémoire centrale et plus de 20 pétaoctets de capacité de stockage. Son débit atteint les 500 gigaoctets/seconde. Son coût est estimé entre 50 et 70 millions d'euros.

Bull reste aujourd'hui, après les retraits de Siemens et de Phillips, le seul constructeur européen de supercalculateurs. Il s'agit d'un marché hautement stratégique dépendant largement de la puissance publique dont la rentabilité et les retombées technologiques s'inscrivent dans le long terme.

<sup>20</sup> [www.prace-project.eu](http://www.prace-project.eu).

<sup>21</sup> CCRT : Centre de calcul recherche et technologie du CEA à Bruyères-le-Châtel : [www-ccrt.cea.fr](http://www-ccrt.cea.fr).

<sup>22</sup> CINES : Centre informatique national de l'Enseignement supérieur à Montpellier : [www.cines.fr](http://www.cines.fr).

<sup>23</sup> IDRIS : Institut du développement et des ressources en informatique scientifique du CNRS à Orsay : [www.idris.fr](http://www.idris.fr).

<sup>24</sup> Société du groupe Safran.

<sup>25</sup> Lors du salon Supercomputing 2009 qui a réuni à Portland (Oregon, États-Unis) près de 10 000 congressistes, Bullx a été désigné meilleur supercalculateur au monde (*Best HPC server product or technology*) par la rédaction de HPCwire, principale revue dans la simulation numérique et le calcul haute performance. Au choix de la rédaction s'ajoute celui des lecteurs de HPCwire qui ont classé Bullx parmi les 5 nouvelles technologies à suivre (*Top 5 new products or technologies to watch*).

Conscient de l'importance de la simulation pour la compétitivité et l'innovation et du retard accusé par la France, le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a développé, reprenant les recommandations du rapport « Héon-Sartorius »<sup>26</sup>, un dispositif particulier avec :

- **une programmation dans le cadre de l'Agence nationale pour la recherche ;**
- **la création de GENCI<sup>27</sup> (Grand Équipement national de calcul intensif)** chargé de développer des moyens de calcul, de représenter la France pour la mise en œuvre de l'initiative européenne PRACE dont l'objectif est de préparer le déploiement en Europe à partir de 2010 d'une infrastructure de supercalculateurs d'une puissance supérieure ou égale au pétaflops et d'assurer la coordination des principaux équipements nationaux. GENCI a notamment mis en place une procédure unifiée d'attribution des heures de calcul sur les trois centres nationaux ;
- la mise en place du **Comité stratégique du calcul intensif (CSCI)<sup>28</sup>** chargé de conduire des études et des réflexions ainsi que de formuler des propositions sur l'organisation et le renouvellement des équipements de calcul intensif nationaux, de même que sur la participation française aux coopérations européennes et internationales.<sup>29</sup>

#### GENCI, un grand équipement national de calcul intensif

Doté d'un budget de 100 millions d'euros sur 4 ans, GENCI est une société civile à laquelle participent pour 49 % le MESR, 20 % le CEA, 20 % le CNRS, 10 % les universités<sup>30</sup> et 1 % l'INRIA. GENCI a permis d'améliorer fortement les moyens mobilisés par la France en faveur du calcul haute performance<sup>31</sup> et ainsi de repositionner le pays au plan international. La puissance totale de calcul offert aux scientifiques français depuis la création de GENCI en 2007 a été multipliée par 30. Elle est passée de 20 à 596 téraflops. Il s'agit d'une des meilleures dynamiques de croissance mondiales en 2009. Cette dynamique sera maintenue et renforcée en 2010, notamment avec l'extension de la capacité de calcul de la machine Jade du CINES, dotée de 120 téraflops supplémentaires. Enfin, dans le cadre du projet européen PRACE, la France, représentée par GENCI, s'est engagée à construire un supercalculateur pétaflops sur le site de Bruyères-le-Châtel. La mise en service de ce Très Grand Centre de calcul (TGCC) est prévue à l'horizon 2011-2012. GENCI a, par ailleurs, mis en place une procédure unifiée d'attribution des heures de calcul sur les trois centres nationaux que sont le CCRT, le CINES et l'IDRIS.

#### Le déploiement des supercalculateurs à venir nécessitera la coopération d'équipes multidisciplinaires d'informaticiens, d'experts en traitement numérique et des domaines d'application considérés.

Ainsi, le Campus Ter@tec<sup>32</sup> devrait regrouper fin 2011, sur le site de Bruyères-le-Châtel, des industriels, des laboratoires, des plateformes de services et une structure de formation au niveau master. Parmi les implantations prévues sur le Campus, deux laboratoires font l'objet d'accords formels, l'un sur le développement et la performance des architectures et des systèmes à très hautes performances (initiative CEA-Bull), le second mené par le groupe INTEL sur les logiciels à très haute performance, en partenariat avec le CEA, l'université de Versailles-Saint-Quentin et GENCI. Un troisième sur la conception de systèmes complexes (initiative Dassault-Aviation-ESI-Group) a fait l'objet d'une annonce en juin 2010. Le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a, de même, annoncé la création d'une « Maison de la simulation » sur le plateau de Saclay.

Pour leur part, GENCI, l'INRIA et OSEO travaillent à élaborer un plan d'action, baptisé « HPC pour les PME » en liaison avec les pôles de compétitivité System@tic, Axelera, Aerospace vallée et Minalogic. L'enjeu est d'amener des PME à « se poser la question du calcul intensif », en les aidant à en évaluer la pertinence au regard de leur modèle de croissance et en mobilisant les acteurs du calcul intensif les mieux à même de les accompagner.

<sup>26</sup> Héon M. et Sartorius S., IGAENR-CGTI (2005), *La politique française dans le domaine du calcul scientifique*. <http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/054000650/0000.pdf>.

<sup>27</sup> [www.genci.fr](http://www.genci.fr).

<sup>28</sup> Rapport du Comité stratégique du calcul intensif (2008) : [www.irisa.fr/orap/Publications/CSCI\\_Rapport2008.pdf](http://www.irisa.fr/orap/Publications/CSCI_Rapport2008.pdf).

<sup>29</sup> Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) (2008), Dossier de presse CEA : [www.cea.fr/content/download/5353/34954/file/CEA\\_CCRT.pdf](http://www.cea.fr/content/download/5353/34954/file/CEA_CCRT.pdf).

<sup>30</sup> Représentées par la Conférence des présidents d'université.

<sup>31</sup> *Revue de l'électricité et de l'électronique* (2009), *op. cit.*

<sup>32</sup> Ter@tec est une association regroupant, à l'initiative du CEA, de grandes entreprises, des PME et des laboratoires de recherche : [www.teratec.eu](http://www.teratec.eu).



 Propositions

La simulation numérique et le calcul intensif sur lequel elle s'appuie occuperont une place grandissante dans l'avancée des connaissances et la démarche industrielle. Ces outils au service de la recherche et de la compétitivité industrielle demandent de l'Europe (seul échelon pertinent compte tenu de l'explosion des coûts) et de la France un engagement dans la durée pour continuer d'accompagner le développement du calcul intensif et préparer les générations futures de supercalculateurs. Il appartient aux pouvoirs publics de :

***Proposition n° 1. Garantir le développement du calcul intensif sur le moyen terme et conforter GENCI dans ses missions***

Comme le souligne la première des six recommandations du CSCI dans son rapport<sup>33</sup> de décembre 2008, et sachant que les capacités de calcul doublent tous les ans, au moins aux États-Unis, il convient de « *poursuivre la dynamique nationale mise en place par GENCI pour coordonner les moyens de calcul nationaux et leur financement, formant une politique cohérente de renouvellement du matériel dans une optique de pérennité et de progression régulière* ».

***Proposition n° 2. Créer des formations qualifiantes pérennes en calcul intensif, de la licence jusqu'au doctorat***

Le calcul intensif nécessite la maîtrise de compétences scientifiques pluridisciplinaires et d'une technologie informatique de pointe. Or en France, où les sciences informatiques ont beaucoup de difficulté à être reconnues comme une discipline scientifique à part entière, il n'existe que quelques cursus de formation au calcul intensif et, au mieux, de niveau master, ce qui n'est pas le cas des autres partenaires PRACE ni des États-Unis ou du Japon où les étudiants sont sensibilisés au problème du calcul intensif de la licence au doctorat. Cette recommandation qui apparaît aussi dans les rapports 2008 et 2010 du CSCI est fondamentale car elle engage la pérennité du calcul intensif à long terme. Ce constat<sup>34</sup> n'est pas sans relation avec le faible nombre d'équipements de proximité en calcul parallèle ou mésocentres. Seule une vingtaine existe en France, de taille très inégale. Le dernier à avoir été mis en service est le centre CALMIP de Toulouse.

***Proposition n° 3. Soutenir le développement d'une industrie française et européenne des supercalculateurs dans le cadre du programme « Dépenses d'avenir »***

« *Renforcer les capacités de calcul intensif, aussi bien en termes de grilles que de supercalculateurs (projet européen PRACE, notamment), et le développement de nouveaux supercalculateurs plus performants* » : telle est l'une des préconisations<sup>35</sup> pour le « Grand emprunt » du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, au sein de l'enveloppe de 2,5 milliards d'euros envisagée à la rubrique « usages numériques ».

Le développement des nouvelles générations de supercalculateurs, et en particulier la R & D nécessaire, ne peut reposer sur les seules ressources des quelques industriels européens du domaine. De par ses aspects stratégiques, en effet, cette R & D est très largement financée outre-Atlantique sur fonds gouvernementaux. Vouloir préserver une certaine autonomie<sup>36</sup> européenne sur un outil aussi essentiel à nos applications les plus sensibles demande que soit compensé le handicap existant, du moins en partie. Cela, alors que la capacité de concevoir et réaliser des ordinateurs de grande puissance vient d'être démontrée par Bull avec la réalisation de Tera 10 et de Tera 100. La pérennisation de cette capacité en Europe est ainsi l'objet du projet NumInnov présenté par Bull et le CEA et soumis au financement du programme « Dépenses d'avenir ».

<sup>33</sup> Rapport du Comité stratégique du calcul intensif (2008) : [www.irisa.fr/orap/Publications/CSCI\\_Rapport2008.pdf](http://www.irisa.fr/orap/Publications/CSCI_Rapport2008.pdf).

<sup>34</sup> Pour plus de détails, se reporter au compte rendu de l'atelier 4 *Les métiers du calcul numérique : formation, recherche et débouchés* du colloque « Penser pétaflops » (2008) : <http://calcul.math.cnrs.fr/Documents/DocOfficiels/Atelier4-Formation-Rapport-08.11.13.pdf>.

<sup>35</sup> Vingt-neuf projets issus de la stratégie nationale de la recherche et d'innovation pour le Grand Emprunt : [http://media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/grand\\_emprunt/66/1/29\\_propositions\\_pour\\_le\\_Grand\\_emprunt\\_national\\_121661.pdf](http://media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/grand_emprunt/66/1/29_propositions_pour_le_Grand_emprunt_national_121661.pdf).

<sup>36</sup> Sachant que l'Europe est toutefois totalement dépendante en matière de microprocesseurs.

***Proposition n° 4. À l'instar des États-Unis, favoriser l'émergence d'une infrastructure de recherche européenne d'envergure internationale et renforcer le processus d'innovation et de transfert en améliorant les relations public/privé, pour faire de la France l'un des pivots du calcul intensif.***

Dans le cadre de PRACE, il convient de favoriser l'émergence d'une infrastructure de recherche européenne comparable à ce qui existe aux États-Unis ou au Japon (où des équipes internationales peuvent s'investir sur des projets à long terme, sur 10 à 15 ans). Au-delà de l'acquisition de machines puissantes, il s'agit de créer, autour d'un tel centre ou réseau de centres de recherche, un écosystème pluridisciplinaire associant projets applicatifs à court terme et programmes de longue haleine sur les technologies des supercalculateurs et les codes applicatifs du futur, favorisant les échanges entre laboratoires publics et filières industrielles, éditeurs logiciels, communautés Open Source, etc.

La création d'un dispositif européen qui coordonne les efforts, oriente et renforce les transferts technologiques dans le domaine du calcul intensif s'avère indispensable si l'Europe veut se maintenir durablement dans la compétition.

\* \* \*

L'accès au calcul numérique le plus performant et la capacité de disposer de supercalculateurs sont devenus une ressource déterminante de la puissance des nations au service de la défense, de la recherche et de la compétitivité industrielle.

Il convient de souligner combien la France et l'Europe ont su conjuguer leurs efforts, au travers des programmes GENCI et PRACE, et en quelques années revenir au niveau international. Cet engagement demande, pour en recueillir tous les fruits, de s'inscrire dans la durée en termes de soutien budgétaire, d'être accompagné par des formations de très haut niveau, en particulier en ce qui concerne la conception des logiciels, et d'être porté par une infrastructure européenne qui soit un lieu d'innovation et de dialogue entre les acteurs public et privés. Enfin, les capacités de conception retrouvées en supercalculateur doivent donner lieu à un large plan de soutien à la R & D avec comme perspective l'exaflops.

> *Pierre-Henry Suet, Joël Hamelin et Jean-Loup Loyer,  
Département Développement durable*