



## Quelles perspectives pour la simulation numérique à haute performance ?

Jean-Claude André et Gérard Roucairol

Membres de l'Académie des technologies

### 1. Introduction et retour sur les 15 dernières années

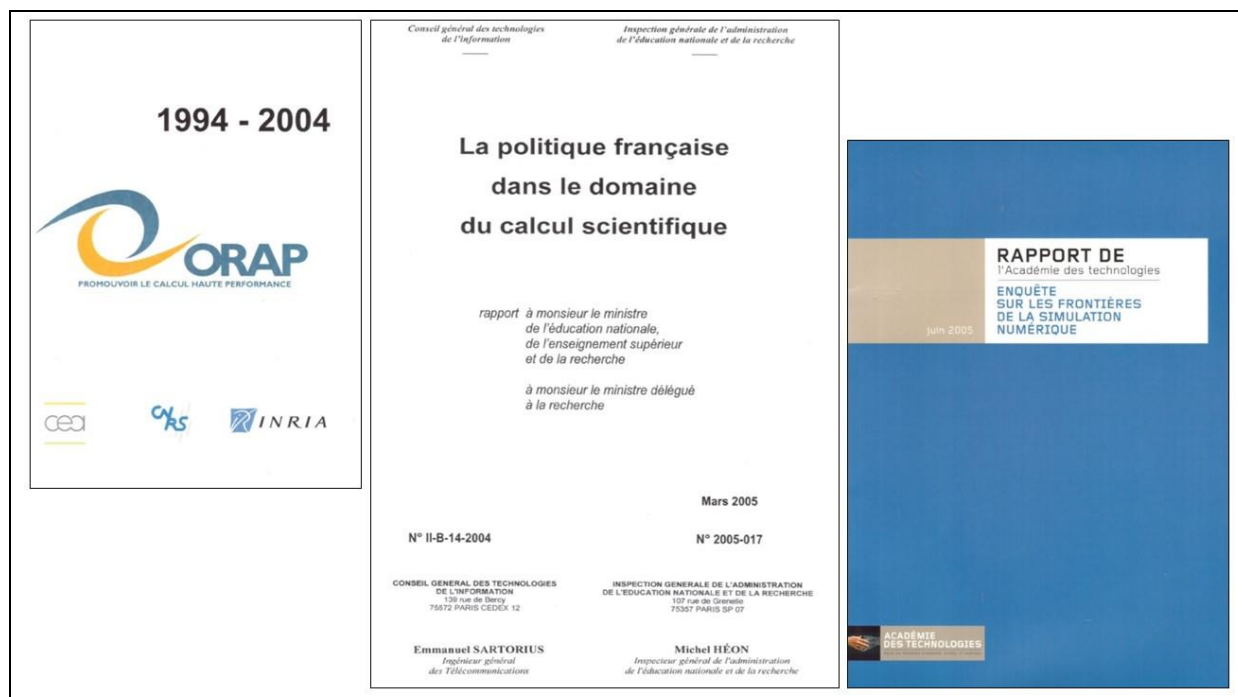
L'Académie des technologies a toujours tenu la simulation numérique pour une discipline indispensable et porteuse de progrès. Si l'on remonte à 2002, à une époque où cette activité était, en France, pratiquement tombée en jachère du fait d'un criant sous-équipement en super-ordinateurs, l'Académie de Technologies, impulsée par Paul CASEAU, décida de mettre en place en 2002 un groupe destiné à faire un état des lieux et à préparer un certain nombre de recommandations pour sortir de ces difficultés. Ce rapport de l'Académie parut en juin 2005, après plus de 3 années consacrées à des auditions de diverses personnalités scientifique et industrielles<sup>1</sup>. La voix de l'Académie accompagnait le rapport dit "HÉON-SARTORIUS", du nom des deux inspecteurs généraux qui le rédigèrent, rapport intitulé "La politique française dans le domaine du calcul scientifique"<sup>2</sup>, paru pratiquement en même temps (mars 2005), rédigé à la demande du Ministre chargé de la recherche et qui permit de convaincre le Ministère de rationaliser le système national, en créant GENCI (Grand Equipement National pour le Calcul Intensif), structure collaborative entre le CEA, le CNRS et les Universités, et d'y investir de façon significative pour relancer l'équipement en super-ordinateurs. Parallèlement l'ORAP, sous l'impulsion de sa Présidente Claudine SCHMIDT-LAINE et toujours avec la participation active de Paul CASEAU, avait publié en mars 2004, à l'occasion de son 10<sup>ème</sup> anniversaire, un document de 120 pages, sans titre (!), consacré à un état des lieux en France et à l'international des enjeux et des perspectives offertes par le calcul à haute performance<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> <https://www.academie-technologies.fr/blog/categories/rapports/posts/enquete-sur-les-frontieres-de-la-simulation-numerique>

<sup>2</sup> <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/054000650.pdf>

<sup>3</sup> <http://orap.irisa.fr/wp-content/uploads/2016/03/livre.pdf>



**Figure 1** : Les pages de couverture des 3 rapports ayant permis de relancer la politique française du calcul à haute performance

**NB** : Dans tout ce qui suit, qu'il s'agisse des caractéristiques citées ou des différents graphiques présentés, nous utiliserons, pour caractériser les superordinateurs à un moment donné, la "moyenne" des machines classées aux 10 premières places du classement dit "TOP 500"<sup>4</sup>. Ceci permet de détecter les tendances les plus nouvelles tout en permettant de lisser quelque peu les fluctuations liées à une machine particulière.

L'affaire était relativement simple en ce milieu des années 2000 : les architectures des super-ordinateurs étaient stables, le parallélisme, encore relativement modéré, permettait de faire travailler ensemble une vingtaine de milliers de CPU<sup>5</sup> et d'atteindre ainsi des puissances voisines de 50 à 60 TeraFlop/s<sup>6</sup>. La puissance des super-ordinateurs doublait encore pratiquement tous les dix-huit mois, et les applications, qu'elles soient scientifiques ou industrielles, pouvaient bénéficier des puissances accrues sans modifications substantielles des codes, à la condition bien évidemment que l'utilisateur puisse investir au bon niveau. Les 3 rapports cités plus haut contribuèrent alors à relancer les investissements publics que les chercheurs, et aussi de nombreux industriels, attendaient.

<sup>4</sup> Ce classement recense deux fois par an (juin et novembre), les caractéristiques et performances des 500 superordinateurs les plus puissants (hors ceux qui sont protégés par le secret militaire !)

<sup>5</sup> Central Processing Unit

<sup>6</sup> Teraflop/s=mille milliard d'opérations par seconde. Les chiffres donnés ici sont relatifs à l'année 2005, cf. NB *supra*

Le paysage du calcul à haute performance se complexifia néanmoins assez rapidement, et sur plusieurs fronts : celui des architectures matérielles, celui des logiciels de programmation, et de celui de la gamme d'applications relevant du calcul avancé. Mais avant d'examiner plus en détail ces différents points, il est utile de rappeler en quoi la simulation numérique reste toujours cruciale pour le progrès des connaissances scientifiques et le développement de l'industrie.

## **2. La simulation numérique à haute performance, la recherche scientifique et l'industrie**

### **2.1. La simulation numérique et le progrès des connaissances scientifiques**

On pourra consulter sur ce point le rapport de EXDCI<sup>7</sup> de 2016<sup>8</sup>, dont sont rappelées ici les analyses concernant divers domaines de recherche.

Traditionnellement les progrès de la météorologie opérationnelle sont liés pour partie à l'accroissement de la puissance de calcul. C'est toujours le cas, le besoin de puissance étant lié tant à la nécessaire diminution de la taille de maille des modèles qu'à l'augmentation de la complexité physique de ceux-ci. L'explosion du nombre des données d'observation (capteurs satellitaires, capteurs embarqués, ...) est aussi un défi de taille, nécessitant de recourir à des méthodes d'assimilation de données de plus en plus gourmandes en ressources informatiques. L'océanographie et la climatologie partagent toutes ces caractéristiques, de même que la sismologie et la volcanologie.

Les questions liées à la physique nucléaire et à la chromodynamique quantique commandent entre autres la compréhension de la formation de l'univers et de l'apparition de la vie, la maîtrise des réactions nucléaires et de leurs applications industrielles. Il est estimé que pour atteindre des résultats scientifiquement robustes dans ces domaines c'est au moins d'un facteur 1.000 qu'il faudra augmenter les performances par rapport à aujourd'hui, et même très certainement au-delà. Des estimations du même type peuvent être faites pour la physique des plasmas, la fusion, les nouveaux matériaux.

Les progrès dans le domaine des sciences de la vie passent par un développement de la puissance des simulations, qu'il s'agisse de simulations moléculaires ou de simulations biomédicales. Certaines d'entre elles peuvent être plus facilement réalisées de façon massivement parallèle, mais beaucoup d'autres

---

<sup>7</sup> "Extreme Data and Computing Initiative", une Action de Support Concerté, ou CSA - "Concerted Support Action", dans le cadre du programme de Recherche H2020 de la Commission Européenne

<sup>8</sup> [https://exdci.eu/sites/default/files/public/files/d3.1\\_0.pdf](https://exdci.eu/sites/default/files/public/files/d3.1_0.pdf)

sont confrontées aux mêmes défis que les autres sciences face aux nouvelles architectures informatiques. Il faut aussi souligner que les sciences de la vie, un peu à l'instar des sciences de l'environnement, doivent pour progresser être capables de conduire simultanément le traitement de données massives et la simulation de modèles physiques.

## **2.2. La simulation numérique et le développement industriel**

On pourra consulter sur ce point le rapport de 2013 de G. ROUCAIROL<sup>9</sup>, dont sont rappelées ici les principales conclusions :

- La simulation numérique à haute performance est un élément clef pour l'amélioration de la productivité, en renforçant les capacités d'innovation, en permettant de diminuer les coûts et les durées des processus industriels, et en augmentant la qualité globale des produits. L'usage de la simulation numérique se diversifie maintenant, au-delà des applications initialement concernées (industrie manufacturière, énergie, défense, ...), vers de nouveaux secteurs : santé, multimédia, technologies du vivant, urbanisme, finance, analyse de risque, environnement, analyse de marchés, ... Cette ouverture s'accompagne le plus souvent de la mise en place d'approches plus globales et plus systémiques, tout en élargissant le nombre de domaines de modélisation et d'applications. Elle s'accompagne aussi d'une évolution pour prendre en compte les aspects liés au traitement aux données massives, ce dernier point étant repris et développé au paragraphe 4.

- Ces évolutions doivent pourtant se faire dans un contexte où les technologies informatiques sont profondément remises en cause (voir paragraphe 5). L'usage du parallélisme massif et des accélérateurs pour gagner en performance constitue une rupture radicale et nécessite donc de recourir à une programmation beaucoup plus complexe, un objectif parfois très difficile à prendre en compte en interne dans les entreprises, obligeant de plus en plus celles-ci travailler en amont avec des fournisseurs de systèmes et de logiciels pour disposer en temps utile des applications qui leur sont stratégiques (principe de "co-design").

- Cette rupture radicale liée au parallélisme massif suppose que de nouveaux logiciels soient créés pour en tirer parti. Cette situation combinée à l'extension des usages et donc des marchés offre de nouvelles opportunités d'innovation en matière

---

<sup>9</sup> G. Roucairol, 2013 : "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 (disponible à <http://calcul.math.cnrs.fr/Documents/DocOfficiels/RapportRoucairol2013.pdf>)

d'architecture d'ordinateur ou de processeur et elle est donc favorable à l'émergence de nouveaux acteurs industriels de la haute performance.

Ce rapport a servi de fondement au lancement par le gouvernement d'un plan industriel dit « supercalculateur » au sein de l'initiative dénommée la « Nouvelle France Industrielle ». Ce plan a permis d'une part de conforter et développer en France nos capacités de conception et de fabrication de supercalculateurs faisant ainsi de notre pays le seul pays Européen concourant à l'atteinte de l'Exaflop/s aux côtés des USA, du Japon et de la Chine. Ce plan a aussi permis par le lancement de plusieurs appels à projets de favoriser la diversification des usages de la haute performance. Par ailleurs une initiative spécifique a été engagée pour développer le recours à la simulation numérique au sein des PME.

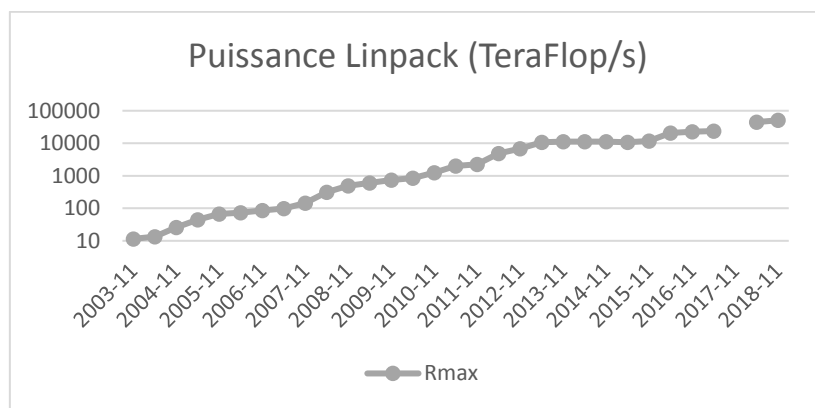
### **3. L'évolution récente des architectures matérielles**

L'augmentation de la fréquence des micro processeurs au-delà de quelques GHz étant devenue rédhibitoire en termes de consommation énergétique ou de chaleur dissipée, la seule manière de gagner de la performance au niveau des circuits intégrés est de profiter du mouvement encore significatif de miniaturisation des transistors sur le silicium pour loger au sein d'un même circuit et à surface constante, plusieurs unités de calcul ou cœurs de CPU. La puissance des ordinateurs découle alors d'un recours systématique au parallélisme à plusieurs niveaux : au niveau d'un circuit comportant plusieurs cœurs, au sein d'un nœud de calcul (serveur) comportant plusieurs circuits intégrés (sockets), au niveau d'un supercalculateur interconnectant un très grand nombre de nœuds (de serveurs).

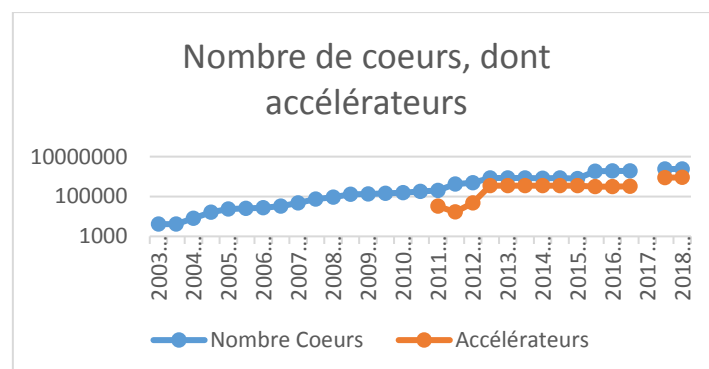
Dans de telles infrastructures la consommation énergétique demeure cependant un problème majeur. Ainsi dès les années 2010 la barre du MW a été franchie au moment où la puissance de calcul atteignait la barre des 100 Teraflop/s. Cette consommation énergétique est bien sur le fruit de la multiplicité des cœurs de calcul mais résulte aussi de nouveaux phénomènes physiques apparaissant à des échelles très faibles de la gravure des circuits intégrés et qui se traduisent par l'apparition de courants de fuite.

Une façon de ralentir la croissance de la consommation énergétique est de recourir à des cœurs de calculs spécialisés qui sont moins gourmands que des cœurs de calcul universel et qui servent alors d'accélérateurs pour ces derniers. C'est ainsi que s'est généralisé pour un nombre important d'applications l'emploi de processeurs spécialisés dans le calcul vectoriel et issu des traitements graphiques (GPU) tout en nécessitant toutefois l'utilisation de nouveaux outils logiciels.

C'est ainsi que sur les 10 dernières années la puissance de calcul des meilleurs superordinateurs a pu être multiplié par un facteur de l'ordre de 150, passant de quelques centaines de TeraFlops/s à plusieurs dizaines de PetaFlop/s (Figure 1), au prix de la multiplication du nombre de cœurs de calcul, passant simultanément d'un peu moins de 100.000 à près de 2.500.000, dont une partie de plus en plus importante sont des accélérateurs, ces derniers n'apparaissant véritablement qu'en 2011 pour représenter aujourd'hui près de 40% des cœurs de calculs (Figure 2). Facteur 25 sur le nombre de cœurs, facteur de 150 sur la puissance de calcul, ne conduisant *in fine* qu'à une multiplication par 8 de la consommation énergétique (Figure 3).

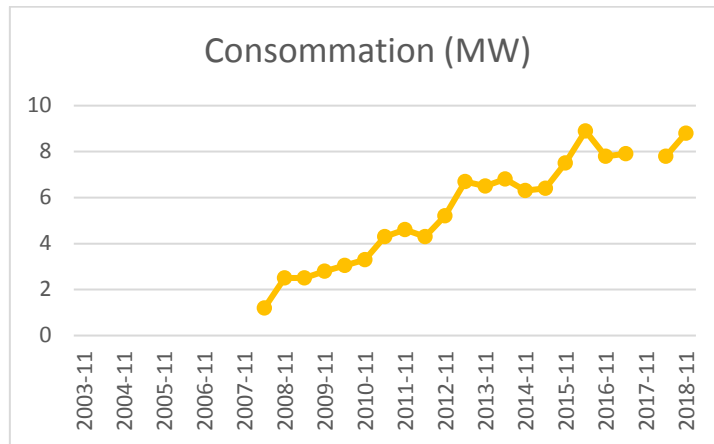


**Figure 1 :** Evolution de la puissance de calcul de la moyenne des 10 superordinateurs les plus puissants au cours des 15 dernières années. A noter que les données du TOP 500 de novembre 2017 ne sont pas prises en compte car l'apparition *pour ce seul classement*, et en 4<sup>ème</sup> position, de la machine japonaise dite "Gyoukou", riche de 19.860.000 cœurs dont 19.840.000 accélérateurs, d'une puissance de 19,136 PF et ne consommant que 1,35 MW, introduirait un point singulier dans la courbe et occulterait quelque peu la tendance d'ensemble.



**Figure 2 :** Evolution du nombre de cœurs de calcul, incluant l'évolution du nombre des accélérateurs, de la moyenne des 10 superordinateurs les plus puissants au cours des 15

dernières années. Même remarque que pour la figure 1 en ce qui concerne l'omission des données de novembre 2017.



**Figure 3** : Evolution de la consommation électrique de la moyenne des 10 superordinateurs les plus puissants au cours des 10 dernières années. Même remarque que pour la figure 1 en ce qui concerne l'omission des données de novembre 2017.

A quoi faut-il s'attendre désormais quant à l'évolution prévisible des architectures de calcul ? Si les grandes tendances mentionnées *supra* semblent installées sur la durée, il n'en reste pas moins que les architectures évolueront *aussi* en fonction des applications qui se révéleront prépondérantes et qui seront donc susceptibles d'orienter le marché du HPC<sup>10</sup>.

A long terme cependant, la miniaturisation des transistors ralentissant voire se terminant, ce sont des architectures radicalement nouvelles qu'il conviendra d'inventer. Ces nouvelles machines reposeront sur l'exploitation de nouveaux phénomènes physiques (calcul quantique) voire biologique.

#### 4. L'émergence d'une nouvelle problématique

C'est vers 2010 qu'est apparue au grand jour la problématique des données massives ("big data"), essentiellement au sein d'entreprises comme Google et Facebook. Mais il est apparu depuis, et très clairement, qu'il ne s'agissait pas simplement d'un mouvement isolé, mais d'une tendance lourde, affectant de nombreux secteurs de la société et impactant profondément les domaines de la recherche et de la technologie. Le développement très rapide des sources de données (capteurs embarqués, internet des objets, ...), la croissance explosive du nombre et de la nature des données numériques ainsi générées, et enfin le type de

<sup>10</sup> High-Performance Computing

traitements de plus en plus élaborés qui leur sont appliqués, sont une source de profondes modifications du paysage du calcul scientifique.

Une première modification concerne l'effacement à terme de la frontière entre le monde du calcul à haute performance (HPC) et celui de l'analyse de données à haute performance (HPDA<sup>11</sup>). Si, à l'origine, chacune de ces approches a développé ses propres infrastructures et ses propres outils logiciels, impliquant *de facto* une quasi-indépendance entre le HPC et le HPDA (Figure 4), l'apparition d'applications où calcul proprement dit et traitement des données doivent aller de pair va rendre très pénalisant le maintien de ces frontières.

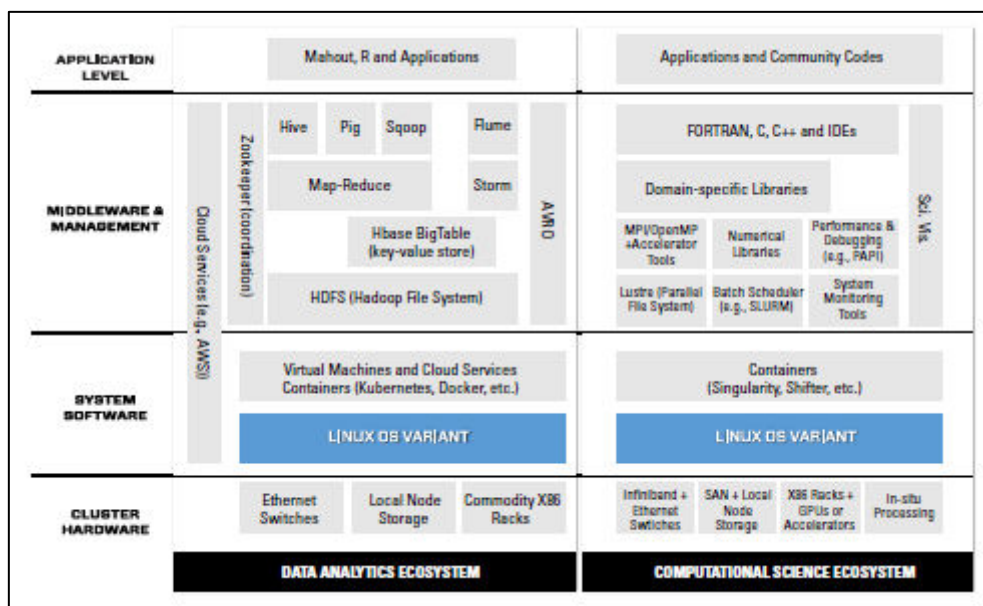


Figure 4: Caractéristiques des écosystèmes logiciels actuels pour le HPC et le HPDA

Par ailleurs, la production de données connaît sa croissance la plus marquée aux frontières ("edges"), c'est-à-dire dans des environnements tels que les grands instruments scientifiques, les capteurs d'imagerie, et plus généralement tous les capteurs distribués résultant du développement de l'"Internet des Objets". Ces environnements sont le plus souvent caractérisés par une insuffisance, voire un manque complet, de capacités de stockage et de traitement, de telle sorte que la gestion de ces données repose encore actuellement sur leur acheminement vers des centres de données ou vers le "cloud", via des réseaux dont la capacité est toujours surpassée par l'importance des flux à transférer. C'est ainsi qu'est née l'idée d'une capacité combinée de (pré)-traitement, stockage et transfert qui puisse être déployée au plus près de ces données, "aux frontières", et qu'est apparu le concept de "Data Service Platforms"(DSP). L'évolution nécessaire vers plus de capacité de calcul rend indispensable pour la communauté HPC de travailler à la mise en place des nouveaux

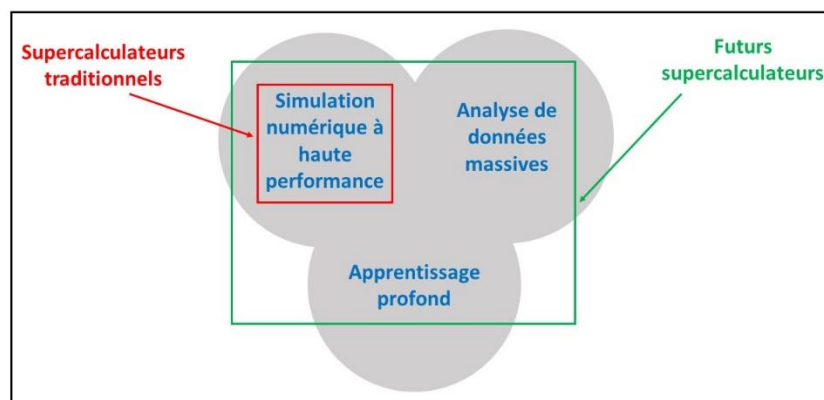
<sup>11</sup> High-Performance Data Analytics



ensembles logiciels adaptés à l'exascale<sup>12</sup> (parallélisme massif, architectures hybrides avec CPU et accélérateurs, ...) ; mais les supercalculateurs "exaflopiques" qui utiliseront ces ensembles devront être vus comme des nœuds au sein d'un large réseau d'autres ressources indispensables pour traiter le déluge de données, sachant toutefois que les exigences de performance font que les données utilisées par un traitement doivent être localisées au plus près géographiquement de l'endroit où se situe le traitement.

Les conséquences prévisibles de ces deux grands types d'évolution font que les infrastructures de calcul, de traitement, de réseau et de mise en œuvre logicielle vont connaître d'importants bouleversements et que de bons équilibres entre centralisation et décentralisation sont à trouver.

Les infrastructures matérielles vont évoluer vers des architectures associant HPC, HPDA et apprentissage profond, comme schématisé à la figure 5. Certaines de ces architectures pourront être rapprochées des sources de données les plus massives, "aux frontières", tandis que d'autres pourront rester dans les centres plus conventionnels, et ceci en fonction de l'origine et de la nature des données. Ces données pourront en effet arriver directement depuis des capteurs, le plus souvent en temps réel et sans avoir été préalablement centralisées, soit d'archives déjà organisées, soit enfin comme combinaisons de données de simulation et d'observations.



**Figure 5** : La vision des futures plateformes de calcul intensif, associant HPC, HPDA et intelligence artificielle (via l'apprentissage profond)

<sup>12</sup> L'exascale fait référence à des capacités associant une puissance de calcul exaflopique (soit  $10^{18}$  opérations par seconde) et des capacités correspondantes de gestion des données (pour fixer les idées, de masses de données de l'ordre de l'exaoctet)

Il faudra que scientifiques et industriels s'adaptent à, et maîtrisent, des flux de tâches et des processus ("workflows") dont la complexité excèdera notablement la complexité actuelle. Cette problématique émerge dans de nombreuses applications scientifiques et technologiques, où HPC et HPDA commencent à être combinés au niveau de ces flux de tâches organisant calcul proprement dit et traitement et exploitation des données, que celles-ci relèvent de l'observation, de l'expérimentation, voire de la simulation elle-même. Cette logistique des données peut recouvrir différents aspects. Il est par exemple très souvent nécessaire de réaliser au plus près des données de premiers traitements, afin d'en extraire l'information la plus utile sans avoir à "déplacer" la totalité de celles-ci, que ces premiers traitements soient réalisés près du supercalculateur quand il s'agit par exemple de données de simulation, ou en proximité immédiate des sources de données quand il s'agit de données d'observation ou d'expérimentation. Ceci recouvre donc à la fois des questions d'entrées/sorties sur les supercalculateurs eux-mêmes jusqu'aux flux à organiser depuis des sources éloignées et/ou distribuées.

Mais concevoir de nouveaux flux de tâches et de processus et s'adapter à de nouvelles infrastructures matérielles demandent aussi une intégration plus poussée entre aspects logiciels et matériels. Ceci requiert de surmonter des différences de cultures entre spécialités, de faire évoluer les compétences pour faire face aux nouvelles questions, ... Tous ces difficiles défis concernant cette "convergence calcul - données" sont depuis plusieurs années l'objet d'une réflexion et concertation internationale, notamment au sein du programme BDEC (pour "Big Data and Extreme Computing"). La France et l'Europe y sont très présentes, sur la base des travaux menés dans le cadre du projet EXDCI (cf. note de bas de page <sup>7</sup> *supra*), maintenant relayé par sa prolongation EXDCI-2. Le dernier en date des rapports BDEC permet d'approfondir la plupart des points identifiés ici (Figure 6).

Les exemples d'applications où la complémentarité étroite calcul-données se manifeste d'ores et déjà sont de plus en plus nombreux. On peut par exemple citer la simulation en météorologie et climatologie, où la prise en compte des phénomènes et des processus se développant à échelle fine, c'est-à-dire à une échelle inférieure à la taille maille du modèle de simulation, pourra progressivement être opérée non plus sur la base de traitements simplifiés, appelés "paramétrisations", mais en tirant parti, via des méthodes d'apprentissage, du grand nombre de données expérimentales déjà disponibles à ces petites échelles et correspondant au type de situation étudié. D'autres applications peuvent concerner la maintenance prédictive, où l'utilisation d'un modèle mathématique, simulant par exemple le fonctionnement évolutif d'un moteur, peut être couplée avec des données de capteurs transmettant en temps réel les caractéristiques de tel ou tel de ses composants, et permettant d'actualiser au mieux l'état de fonctionnement de ce moteur. Il s'agit de fait d'un exemple très généralisable aux cas où la simulation par le calcul concerne l'évolution d'un phénomène ou d'un objet pour lesquels des données d'observation apparaissent progressivement en cours de calcul, données qui peuvent alors être

prises en compte pour actualiser la trajectoire donnée par le modèle numérique, par exemple via des méthodes de contrôle optimal. Ces méthodes sont plus connues sous le nom d'"assimilation de données" et sont déjà présentes dans un grand nombre d'applications géophysiques. Pour "boucler la boucle" de cette tendance à l'usage de méthodes hybrides calcul-données, soulignons que l'administration même d'un supercalculateur peut tirer parti de méthodes d'apprentissage artificiel afin d'optimiser la gestion des ressources de calcul et d'archivage en vue de fluidifier et accélérer le traitement de suites de travaux (batch) ou encore prédire l'apparition de pannes et procéder de manière préventive aux reconfigurations nécessaires.

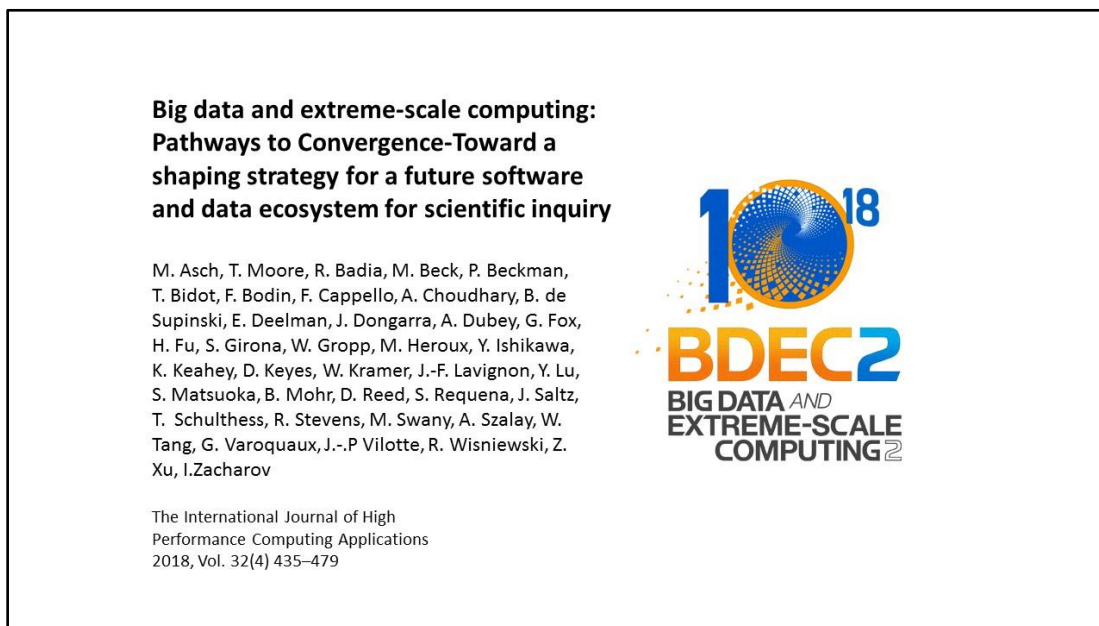


Figure 6

## 5. Vers les futures architectures matérielles

La demande des applications vers plus de puissance tant des unités de traitement que des nouvelles mémoires, des nouveaux moyens de stockage et des nouveaux réseaux, et vers des systèmes de tailles supérieures, va conduire à des modifications de l'architecture des systèmes HPC. Le franchissement de la prochaine étape de performance, celle de l'exascale, va reposer en bonne partie sur la résolution de verrous technologiques majeurs et les voies pour y parvenir sont multiples.

## 5.1. Quelques évolutions technologiques<sup>13</sup>

La tendance va clairement vers des unités de traitement associant de très nombreux cœurs de calcul et accélérateurs (GPU<sup>14</sup>, FPGA<sup>15</sup>, voire TPU<sup>16</sup> plus adaptés au traitement des données). Mais une utilisation accrue de ces unités de traitement passe par une meilleure intégration au sein des nœuds de calcul et des systèmes eux-mêmes. La performance souhaitée nécessitera aussi une bande passante beaucoup plus grande que celle des mémoires DRAM<sup>17</sup> actuelles. Ceci semble possible en complétant, ou remplaçant, les mémoires DRAM par des mémoires RAM non-volatiles à grande bande passante, dont la technologie semble assez avancée. Des systèmes HPC utilisant ces nouvelles technologies, même demandant une certaine reconfiguration des applications, permettraient assez facilement de relancer les simulations en cas de panne d'unités de traitement au cours du calcul<sup>18</sup>, perspective à prendre en compte face au parallélisme massif des futurs systèmes.

Les futurs systèmes HPC seront massivement parallèles, associant plusieurs millions, voire dizaines de millions, de cœurs de calcul au sein de plusieurs milliers de nœuds. Ces derniers devront être couplés entre eux via un réseau à large bande passante et à faible latence, desservant aussi les unités de stockage. Ces réseaux devront rester performants ("passer à l'échelle") avec l'augmentation du nombre et de la puissance des nœuds de calcul et des unités de stockage. Ce cahier des charges est bien à l'esprit des constructeurs informatiques.

La virtualisation commence aussi à pénétrer le monde des systèmes HPC, ce qui permettrait une utilisation plus souple et plus facile, si toutefois l'impact sur les performances peut rester suffisamment faible. L'interaction de plus en plus forte entre le HPC et le HPDA (voir paragraphe 4) sera aussi source de nouvelles stimulations tant pour les développements technologiques que pour les logiciels, qui devront aller de pair.

## 5.2. Les infrastructures européennes

L'ensemble des défis scientifiques, industriels et technologiques présentés brièvement ici ont conduit à plusieurs initiatives, à commencer par PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe). Actif depuis 2010, PRACE offre aux

---

<sup>13</sup> On pourra se reporter à l'analyse beaucoup plus détaillée produite par ETP4HPC (European Technology Platform for High Performance Computing) dans son "Strategic Research Agenda" (SRA, disponible à <http://www.etp4hpc.eu/pujades/files/SRA%203.pdf>)

<sup>14</sup> Graphic Processing Unit

<sup>15</sup> Field-Programmable Gate Array

<sup>16</sup> Tensor Processing Unit

<sup>17</sup> Dynamic Random Access Memory

<sup>18</sup> Via la méthode dite de "check-point restart", ou de "point de contrôle et reprise"

scientifiques européens l'accès à un ensemble de super-ordinateurs mis à disposition par quelques pays membres, sur la base de projets sélectionnés sur des critères d'excellence scientifique. L'accès est maintenant aussi offert aux projets industriels de R&D<sup>19</sup>. Via PRACE il est ainsi possible aujourd'hui d'accéder à plusieurs superordinateurs, dont deux présents dans les 10 premiers du dernier classement du Top500.

Au-delà de PRACE, il est apparu plus récemment qu'un effort plus substantiel devait être initié, tant pour permettre à l'industrie informatique européenne de jouer un rôle international de premier rang que pour ouvrir de nouvelles perspectives aux applications les plus demandeuses en ressources. La déclaration de création de l'initiative dite "EuroHPC<sup>20</sup>", a été signée par 7 pays fondateurs (dont la France) en 2017, avant la mise en place 18 mois plus tard d'une structure de gouvernance rassemblant 25 pays européens. L'objectif de EuroHPC est d'équiper l'Europe de 2 superordinateurs "pré-exascale" dès 2020, et de 2 à 3 superordinateurs "exascale" à l'horizon 2023, dont un de technologie européenne. Un tel effort n'ira pas sans une certaine recomposition du paysage de la simulation numérique en France et en Europe ...

## 6. Quelques éléments en guise de conclusion

Il n'a pas encore été souligné que la diffusion de ces nouvelles possibilités, autorisées par l'évolution des méthodes de simulation et des architectures d'ordinateur, est cependant freinée par la rareté des compétences humaines disponibles. Le déficit de main d'œuvre qualifiée est fort, et la formation des compétences nécessaire. Ceci peut être une opportunité pour contribuer à mettre fin à la séparation traditionnelle entre "matériel" et "logiciel", séparation peu propice en la période actuelle où les ruptures sont nombreuses.

L'Académie des Technologies a mis en place au début 2018 un groupe de travail sur la simulation numérique, dont l'objectif est d'approfondir un grand nombre de points évoqués ici. Ce groupe de travail reçoit mensuellement des scientifiques et des industriels, qui présentent les stratégies de développement de leurs applications. Au-delà des partages et des retours d'expérience que permettent ces rencontres, l'objectif est de parvenir vers la fin 2019 à un rapport présentant un état des lieux bien documenté et, autant que de besoin, des recommandations tant vers les utilisateurs, principalement industriels que vers les pouvoirs publics.

---

<sup>19</sup> Voir <http://www.prace-ri.eu/hpc-access/industry-access/>

<sup>20</sup> <http://eurohpc.eu/>