

4 Modélisation, simulation et ingénierie numérique

LOISIRS
& CULTURE

ÉNERGIE,
MOBILITÉ,
NUMÉRIQUE

ENVIRONNEMENT, HABITAT,
SANTÉ ET BIEN-ÊTRE, SÉCURITÉ

ALIMENTATION

➤ Correspond à
une technologie clé 2015

MOTS CLÉS

simulation, modélisation,
prévention, prédiction,
circulation, visualisation,
intégration, déluge de
données, hétérogénéité
de données, logiciels,
marché concentré



Définition et périmètre

Définition

Les technologies de simulation, de modélisation et d'ingénierie numérique visent à construire et à adapter aux moyens numériques un ensemble de fonctions mathématiques décrivant un phénomène qui peut comprendre des dimensions physiques, mécaniques, chimiques, biologiques ou sociales. En modifiant les variables de départ, il est ainsi possible de prédire les modifications et évolutions d'un système étudié.

Initialement appliquées à des domaines, tels que la métrologie, la mécanique, les matériaux ou l'écoulement des fluides, la simulation, la modélisation, et l'ingénierie numérique trouvent des applications dans des domaines de plus en plus nombreux : des réseaux de télécommunications en passant par la circulation d'énergie ou de personnes, la chimie, la biologie, les nanotechnologies, l'environnement et le climat, l'énergie, etc. **Le caractère multi-physique et multi-échelle de ces nouveaux types de phénomènes étudiés renforce le besoin de hiérarchiser le « déluge de données¹ » qui doivent être analysées.**

Les modèles sont ainsi conçus pour traiter la bonne information à la bonne échelle.

Un champ d'applications particulièrement vaste

La modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique sont au cœur du domaine du numérique puisque des modèles mathématiques sont présents à toutes les étapes de la conception et du déploiement des **infrastructures et des services de télécommunications** (internet, smartphones, vidéo à la demande, etc.). L'enjeu est dans ce domaine d'éviter tout engorgement et d'offrir des services de qualité et des protocoles toujours plus performants. Cela passe notamment par l'analyse du trafic dont les propriétés évoluent en permanence.

Les applications de la simulation-modélisation numérique en santé sont multiples. Des modèles peuvent ainsi servir la **médecine régénérative** comme la **médecine préventive** et **prédictive** en modélisant l'évolution des pathologies (maladies neurodégénératives et chroniques, oncologie, AVC). Ces technologies

permettent également de déceler des bio-marqueurs. L'ingénierie numérique est ainsi placée au cœur de la **médecine in silico**, qui est basée sur la modélisation virtuelle de processus biologiques réels, son objectif étant d'arriver à une modélisation complète du corps humain. Enfin, les technologies de modélisation et de simulation numérique permettent de faire avancer l'épidémiologie et la gestion des pandémies.

Le domaine de l'énergie est également amené à être fortement impacté par l'élaboration de modèles informatiques et d'outils de simulation dans un contexte de prise de conscience du caractère fini des ressources énergétiques fossiles et de la maîtrise des gaz à effet de serre². La modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique permettent ainsi de **comprendre comment produire et distribuer les différentes énergies**, par exemple en optimisant la production de biocarburants ou d'électricité.

Les applications de l'ingénierie numérique ont également un rôle clé à jouer dans le domaine de l'environnement, puisqu'elles permettent non seulement de comprendre les évolutions actuelles et de prévoir leurs conséquences, dans le cadre notamment de la **planification et de la gestion du risque environnemental**, mais aussi d'imaginer des scénarios d'inflexion. Le développement de technologies numériques dans ce domaine concerne en grande partie le développement de modèles prédictifs et de simulations numériques à des échelles très variées (de l'ensemble de la géosphère à l'échelle locale). Le domaine de l'alimentation, lié fortement à des problématiques environnementales, est également touché par ces technologies puisqu'elles permettent de doser les intrants et d'optimiser les procédés. Par exemple, elles peuvent ainsi servir à déterminer des quotas de pêche ou à modéliser la croissance végétale afin d'optimiser les ressources.

En ce qui concerne l'habitat et la mobilité, ces technologies permettent de penser les **villes intelligentes de demain**, par le biais notamment de plates-formes qui interconnectent les modèles de différentes composantes de l'écosystème urbain. Dans le domaine de la mobilité, elles peuvent, par exemple, être appliquées au trafic routier pour permettre d'anticiper des difficultés et de proposer des solutions en temps réel. Des données concernant l'environnement et l'énergie

1 – Terme employé dans *Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017*, Inria, 2013

2 – *Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017*, Inria, 2013

peuvent également être incorporées aux modélisations urbaines de ces « *smart cities* » (services à l'énergie, utilisation des sols et de l'eau, impacts environnementaux, sécurité, etc.). La **maquette numérique** est un autre outil important qui trouve des applications notamment dans l'habitat et l'urbanisme puisqu'elle permet de réaliser des prototypages visuels de projets (à l'échelle d'un bâtiment ou d'un territoire), de manière évolutive et adaptable, aussi bien dans le temps que dans les fonctionnalités.

Enfin, les technologies de modélisation, de simulation et d'ingénierie numérique sont amenées à impacter fortement les domaines des loisirs et de la culture, par le biais notamment de la **modélisation de comportements humains**, à l'échelle des individus comme des groupes sociaux. Toujours en phase de recherche, l'intégration d'aspects sociologiques et psychologiques couplés à des informations biologiques (neurosciences) dans des modèles pourrait ainsi à terme permettre de mieux comprendre, concevoir et exploiter les informations contenues dans les réseaux sociaux. Autre application dont le développement est en plein essor, la possibilité pour des sites de e-commerce de faire virtuellement essayer à leurs clients leurs produits (vêtements, chaussures) via la « cabine d'essayage virtuelle » composée de modèles intégrant leurs paramètres physiques. Cette approche pourrait avoir des conséquences importantes sur la **modélisation de la relation client**.

massives (data analytics). La convergence du *Big Data* et du calcul intensif est ainsi une tendance qui se confirme et devrait permettre de traiter les données massives générées par un nombre croissant de nouveaux capteurs et d'objets connectés, enregistrant des informations sur des phénomènes physiques, l'environnement ou le comportement humain.

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Un fort caractère stratégique

Les technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique sont particulièrement clés à l'horizon 2020 puisqu'elles couvrent un champ incroyablement vaste de domaines et **constituent des solutions à des problématiques essentielles du développement humain** (préoccupations environnementales, gestion de l'énergie et des ressources, avancées thérapeutiques et nouvelle conception de la médecine dans un contexte de vieillissement croissant de la population, etc.)

La **multidisciplinarité** est ainsi au cœur de ces technologies qui bénéficieront des avancées dans leurs différents domaines d'application.

Atouts de la France

Le positionnement français dans ce domaine est également très favorable. La France dispose en effet

Domaine	Principales applications
Numérique	Conception et déploiement des infrastructures et des services de télécommunications
Santé et bien-être	Médecine préventive, médecine prédictive, médecine régénératrice, médecine <i>in-silico</i> , épidémiologie
Énergie	Optimisation de la production de ressources (électricité, biocarburants)
Environnement	Planification des ressources et gestion du risque.
Alimentation	Dosage des intrants et optimisation des procédés
Habitat ; Mobilité	Villes intelligentes (<i>smart cities</i>), maquette numérique
Loisirs & Culture	Modélisation de comportements humains collectifs, modélisation de la relation client.

Tableau récapitulatif des principales applications de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique (Source : ALCIMED)

Par ailleurs, le développement de certaines de ces applications (villes intelligentes et modélisation de comportements humains) **dépend fortement de celui des nouvelles technologies d'analyse de données**

d'excellentes compétences académiques en mathématique et informatique et développe des formations spécifiques appliquées à la modélisation, la simulation, le calcul intensif et l'ingénierie numérique.

L'ensemble de l'écosystème national favorise également l'innovation : des partenariats entre recherche publique et privée ont été mis en place, à travers notamment les travaux de collaboration de grands groupes (au niveau national et international) avec l'Inria.

Dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir, l'État soutient **deux initiatives de diffusion des usages industriels de la simulation en faveur des PME/ETI**, la première portée par GENCI et l'association Teratec, la seconde par l'association Micado. Ces initiatives permettront aux PME/ETI françaises d'intégrer la simulation numérique au sein de leurs processus de développement et de fourniture de produits et de services.

D'ici 2020, le numérique restera une **priorité de la politique de l'État** en faveur de la R&D et de l'innovation, notamment pour le développement de logiciels. La simulation numérique couplée au calcul scientifique constitue également un des axes majeurs des programmes publics d'aide à la R&D, les projets aidés allant de la recherche scientifique « amont » au développement expérimental de solutions industrielles³.

Des entreprises françaises font figure de *leader* mondial dans leur domaine, à l'instar de **Spring Technologies**, qui domine la simulation d'usinage.

Liens avec d'autres technologies clés

La croissance du marché de la simulation, la modélisation et l'ingénierie numérique est liée au développement d'un très grand nombre de technologies clés identifiées dans la présente étude, du fait notamment des nombreux champs d'applications qu'elles couvrent. Parmi les plus importantes ;

Les technologies qui influencent les technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique :

- Les **Capteurs** : les données transmises par les capteurs servent notamment l'actualisation des modèles en temps réel ;
- Certains **Dispositifs bio-embarqués** transmettent également les données nécessaires à la modélisation ou à la simulation pour des applications en santé ;

3 –France numérique 2012-2020 : Bilan et perspectives, Ministère de l'économie, novembre 2011

- Les **Supercalculateurs** : l'augmentation exponentielle des puissances de calcul permet des simulations toujours plus riches, sous réserve que les utilisateurs parviennent à exploiter ces moyens sophistiqués.

Les technologies influencées par les technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique :

- **La Métaomique** : production de très grandes masses de données brutes qu'il faut réussir à intégrer à travers des modèles numériques ;
- **La Fabrication additive** : modélisation et visualisation numérique comme étapes préalables à la fabrication ;
- **La Cobotique et humain augmenté** : par la simulation d'interactions homme-machine (ex. : implants) ;
- **Les Dispositifs bio-embarqués** : utilisation de logiciels de simulation et de modélisation des interactions entre les dispositifs implantés (organes artificiels, prothèses, etc.) et le corps humain ;
- **L'Énergie éolienne** : modélisation et simulation des vents pour l'optimisation en temps réel du fonctionnement des systèmes ;
- **Les Infrastructures de 5^{ème} génération** : importance de la modélisation du réseau pour optimiser son fonctionnement ;
- **L'Ingénierie génomique** : modélisation du génome ;
- **L'Internet des objets** : utilisation pour la modélisation et la simulation des données transmises en temps réel par les objets connectés.

Les marchés

Dynamique du marché mondial

Le marché mondial des technologies de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique est compris dans le marché des logiciels, qui vaut près de 541,6 milliards d'euros en 2014. Ce marché devrait atteindre **789 milliards d'euros en 2020**, sur la base d'une croissance annuelle moyenne de **7,8 %**⁴. Malgré une croissance plus faible que sur la période 2010-2014⁵, ce marché reste l'un des plus dynamiques de l'industrie numérique.

4 –Software : Global Industry Guide, MarketLine, mai 2015

5 –La croissance annuelle moyenne entre 2010 et 2014 est évaluée à 10,9 %

À l'échelle mondiale, le marché est largement dominé par les États-Unis et des entreprises comme **Microsoft et Oracle**, qui ont enregistré des chiffres d'affaires respectifs de 47 et 24 milliards d'euros en 2014. L'Europe est le deuxième marché, suivi par l'Asie Pacifique dont le marché est principalement porté par le développement des industries chinoise et indienne. La Chine, particulièrement positionnée sur le marché de l'édition de logiciels, connaît une croissance dynamique, qui polarise tant les efforts internes que les investissements et implantations étrangères. À l'horizon 2020, ce pays pourrait figurer parmi les *leaders* du marché.

Le marché français, un marché concentré

L'industrie française du logiciel représente quant à elle près de **10 milliards d'euros en 2014**⁶ et son marché intérieur reste dominé par les leaders américains. Le marché français, qui compte près de **2 500 entreprises**, apparaît en effet très concentré puisque les cinq premiers groupes réalisent à eux seuls près de 55 % du chiffre d'affaires français. Le reste du tissu industriel est essentiellement composé d'ETI et de PME.⁷ Le leader français, **Dassault Systèmes**, est deuxième dans sa catégorie en Europe mais ne figure cependant pas au rang des leaders mondiaux, avec un chiffre d'affaires de 2,3 milliards d'euros en 2014.

Des segments en forte croissance

Le marché mondial des logiciels est divisé en plusieurs segments. À titre d'exemple, la simulation numérique pour l'industrie est un segment porteur du marché mondial des logiciels puisqu'il est estimé à 3,7 milliards d'euros en 2014 et devrait atteindre **6,3 milliards d'euros en 2020** sur la base d'une croissance annuelle moyenne de **7,7 %**⁸. À noter qu'en 2013, le marché français sur ce segment était de 350 millions d'euros.

Autre segment intéressant, celui de la simulation médicale devrait quant à lui atteindre **1,4 milliards d'euros en 2020**, alors qu'il est estimé à 613 millions d'euros en 2015, sur la base d'une croissance annuelle moyenne importante évaluée à **14,8 %** entre 2015 et 2020⁹.

6 – *The software and IT services market in France – key figures, trends and opportunities*, PAC, 2014

7 – Données du *Palmarès Truffle 100*, 2015

8 – *Simulation & Analysis Market Analysis Report*, CIMdata, 2014

9 – *Global Medical Simulation Market 2015-2020*, Meticulous Research, 2015

Les défis technologiques à relever

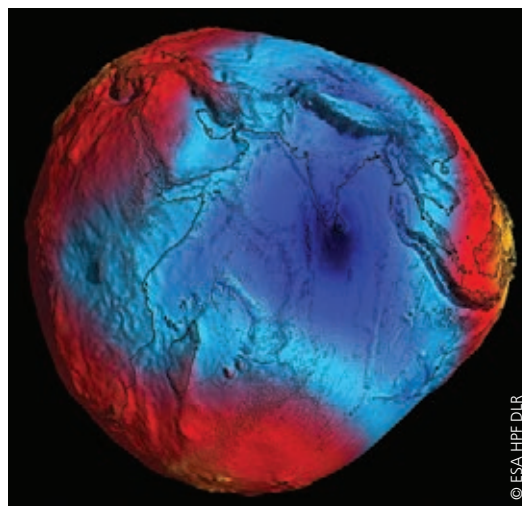
Défis communs à la valorisation et l'intelligence des données massives

Certains défis technologiques qui concernent la modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique sont similaires à ceux développés dans la **fiche n°3 « Valorisation et intelligence des données massives »**. Ces défis concernent :

- Le stockage des données massives et la sécurité des systèmes ;
- La qualité des données ;
- Le temps réel.

Défis spécifiques de la simulation, modélisation et ingénierie numérique

On observe aussi des défis propres à la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique. Ils concernent notamment la nécessité de générer des modèles plus complets, plus précis et intégrant des données de plus en plus hétérogènes. Le **calcul haute performance** (*High Performance Computing*) est dans ce cas un levier intéressant puisqu'il permet de calculer plus vite à partir de données de taille plus importante¹⁰. L'arrivée de calculateurs multi-péta / exa flopiques aux environs de 2020-2025 sera un atout important pour réaliser des simulations complexes passant réellement à l'échelle (complexité des modèles, masse des données utilisées).



10 – Données de l'Inria

À ces défis technologiques généraux s'ajoutent d'autres défis plus spécifiques, comme la question de la **fiabilité des modèles**, en particulier lorsque ceux-ci sont prédictifs et servent la prise de décision (médicale, politique, etc.). En effet, si les logiciels de modélisation et de simulation numérique prennent en compte les probabilités d'erreurs, il demeure essentiel de pousser la recherche sur l'amélioration de la fiabilité des systèmes numériques afin de développer l'« adaptation » des logiciels aux défauts intrinsèques des systèmes¹¹.

Les défis commerciaux et d'usage à relever

Les défis pour les grands groupes : concurrencer les leaders mondiaux

Le marché français de l'édition logicielle est **très concentré et dominé par de grands groupes**, tels que Dassault Systèmes, Cegedim, Sopra Steria, Murex, Cegid et Axway¹². Dassault est le seul groupe à avoir une réelle visibilité internationale même s'il n'est pas présent parmi les leaders mondiaux, essentiellement américains. **Le développement à l'international** de ces groupes français est donc essentiel pour asseoir la position de la France.

Bien qu'ils ne soient pas directement positionnés sur le marché de l'édition logicielle, il est toutefois intéressant de noter que des groupes français d'envergure internationale comme Capgemini, Air Liquide, L'Oréal, Alcatel-Lucent, Veolia Environnement ou Atos développent en interne des logiciels de simulation et de modélisation numérique pour des applications dans leurs domaines respectifs.

Les défis pour les ETI et PME : se développer et atteindre une taille critique

La très grande majorité du tissu industriel dans le domaine des logiciels est par ailleurs composée d'ETI et de PME aux chiffres d'affaires beaucoup moins conséquents, 90 % réalisant moins de 50 millions d'euros par an. L'enjeu pour ces entreprises est donc d'atteindre une taille suffisamment importante afin de **capter des parts du marché intérieur** mais également de pouvoir **se développer à l'international**, par le biais de la qualité de l'innovation notamment.

Le rachat des entreprises françaises particulièrement innovantes (Virtuoz, Kelkoo, Ilog) par des entreprises américaines est un autre défi commercial important auquel l'écosystème français doit faire face.

Les enjeux réglementaires

Les enjeux réglementaires de la modélisation, la simulation et l'ingénierie numérique sont similaires à ceux détaillés dans **la fiche n°3 « Valorisation et intelligence des données massives »**. Ils concernent en particulier :

- Le traitement des données à caractère personnel - surtout lorsque sont en jeu des données de santé comme c'est le cas de certaines applications de la modélisation, de la simulation et de l'ingénierie numérique ;
- Le principe de collecte loyale des données ;
- La sécurité et la confidentialité des données personnelles ;
- La nécessité de mettre en place un cadre juridique spécifique en France, au sein de l'Union Européenne comme à l'échelle internationale.

¹¹ –Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017, Inria, 2013

¹² –Données du *Palmarès Truffle* 100, 2015

Analyse AFOM

ATOUTS

Excellence académique (Inria, communautés scientifiques en mathématiques et en informatique, etc.)

Écosystème national favorisant l'innovation (French Tech, Ambition logicielle, stratégie numérique du gouvernement...)

FAIBLESSES

Absence de leadership international des leaders français de l'édition logicielle

Emiettement du tissu d'entreprises

Faible capacité d'investissement permettant de donner aux PME/ETI françaises des capacités d'accélération

OPPORTUNITÉS

Multidisciplinarité et très vaste champ d'applications possibles, liés notamment à des besoins croissants en énergie, en santé et en environnement.

Mise en place des accélérateurs dans le cadre de la French Tech pour favoriser la croissance des entreprises innovantes.

Initiatives de diffusion des usages industriels de la simulation en faveur des PME/ETI

Essor du *big data* et besoin en capacités d'analyse et de prédiction (modèles, simulation, etc.).

MENACES

Hégémonie du marché américain et montée des acteurs asiatiques

Facteurs clés de succès et recommandations

Aux pouvoirs publics :

■ La France doit conserver et renforcer un écosystème favorable à l'innovation en ce qui concerne les technologies de la simulation, de la modélisation et l'ingénierie numérique. Cette innovation, qui résulte notamment de **partenariats de recherche publics-privés**, est un **levier important pour le développement des entreprises françaises (PME et ETI en tête) à l'international**. Le programme « Ambition Logicielle » lancé en 2013 dans le secteur de l'édition de logiciels dans le but d'aider les entreprises prometteuses à se développer est un bon exemple de partenariats publics-privés à encourager.

Aux entreprises :

■ Le soutien aux entreprises innovantes peut également passer par le **renfort des financements et aides** apportés à la recherche et au développement. Les entreprises peuvent ainsi prendre part à des initiatives publiques comme la « French Tech »

qui met en place des accélérateurs à destination des start-up innovantes (fonds d'investissements) ;

■ Les entreprises doivent également prendre part à des projets d'envergure européenne et internationale afin de renforcer leur présence à l'étranger. Des partenariats doivent également être réalisés avec des acteurs leaders du marché (États-Unis et acteurs européens), mais également avec des pays émergents qui s'intéressent de plus en plus aux problématiques de simulation et de modélisation numérique, comme la Chine (santé et vieillissement, ville numérique) et l'Inde (innovations pour les masses)¹³ ;

■ Enfin, il paraît important que les entreprises françaises **intègrent les technologies du calcul intensif** à celles de la modélisation et de la simulation numérique dans le but de renforcer leur compétitivité par l'innovation. Cette intégration peut se réaliser *via* une participation aux appels à manifestation d'intérêt, à l'instar de « Diffusion de la simulation numérique » réalisé dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

En France, outre **l'Inria, le CNRS et les laboratoires universitaires spécialisés, le CEA, l'ANDRA, le BRGM et l'IFPEN** sont les principaux centres de recherche travaillant sur le développement de la modélisation et de la simulation numérique. A ces centres d'envergure nationale s'ajoutent deux IRT, **SystemX**, qui a lancé un projet de Simulation et Ingénierie Multidisciplinaire, ainsi que **B-Com**, orienté de manière plus générale sur les réseaux et l'hypermédia.

Le CEA, en partenariat avec **l'ONERA**, soutient par ailleurs une formation de Master 2 entièrement dédiée à la modélisation et à la simulation numérique. Cette formation est intégrée au département de mathématiques appliquées de **l'Université Paris-Saclay**.

Grands groupes

Le leader français de la production logicielle est incontestablement **Dassault Systèmes**, qui, s'il fait figure de *leader* européen, ne se positionne pas aujourd'hui en tant que *leader* mondial.

D'autres grands groupes français non spécialistes de la simulation et de la modélisation numérique ont développé des compétences internes pour mettre au point des solutions de simulation et de modélisation numérique dans leurs domaines respectifs. C'est le cas de **Véolia, Alcatel-Lucent, Airbus, Total, EDF, RTE et Capgemini**.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

Les principales ETI françaises occupent le secteur de la production à l'instar de **Cegedim, Sopra Steria, Murex, Axway et Cegid**, qui concentrent avec le géant Dassault Systèmes la majorité du chiffre d'affaires français.

D'autres entreprises de taille intermédiaire comme **Atos**, acteur international des services informatiques et **GENCI**, société civile spécialisée dans le calcul intensif,

13 – Objectif Inria, plan stratégique 2013-2017, Inria, 2013

se positionnent de manière croissante sur le secteur de la simulation et de la modélisation numérique qu'ils intègrent à leur offre. Les deux entreprises ont ainsi lancé en juin 2015 la sixième édition du Prix Bull – Joseph Fourier 2015, visant à accélérer le développement de la simulation numérique et la transformation digitale.

Start-up et PME

Les PME et start-up constituent la grande majorité du tissu industriel français. Beaucoup de ces entreprises sont particulièrement prometteuses malgré des chiffres d'affaires encore peu importants en comparaison de ceux réalisés par les grands groupes du secteur logiciel.

Ces entreprises sont positionnées sur tous les domaines d'applications de la modélisation et de la simulation numérique. Il s'agit notamment de :

- Mécanique et conception : **Spring technologies, Esi Group, HydrOcean, MathWorks, Structure Computation, et EC2 modélisation** ;
- Santé : **Digisens, Rhenovia Pharma, Brain Vision Systems et Lixoft** ;
- Environnement: **Optifluides, Geomod, Datapole et Trinov** ;
- TIC : **Docea Power et QoS Design** ;
- Chimie : **Scienomics et TheCosmocompany** ;
- Energie: **Corys Tess, Izuba energies, Powersys**;

■ Sciences Humaines et sociales: **Golaem, Madea concept, Serious Factory**.

Organismes de soutien et d'interface

Les structures qui soutiennent l'écosystème de l'innovation français en matière de simulation et de modélisation numérique sont principalement **Teratec** et les pôles de compétitivité **Systematic, Cap Digital, Aerospace Valley, Images et Réseaux, SCS, TES, Minalogic** et **Imaginove**.

Le Groupement d'intérêt scientifique (GIS) « **Modélisation Urbaine** » a pour principale mission de faire converger, à l'échelon national, les besoins entre les mondes de la recherche, de l'ingénierie, de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre dans le champ de la modélisation urbaine.

Position des acteurs français

Position des entreprises françaises dans la compétition mondiale

En position de leadership	
Dans la moyenne	●
En retard	

Position des acteurs académiques français dans la compétition mondiale

En position de leadership	●
Dans la moyenne	
En retard	