

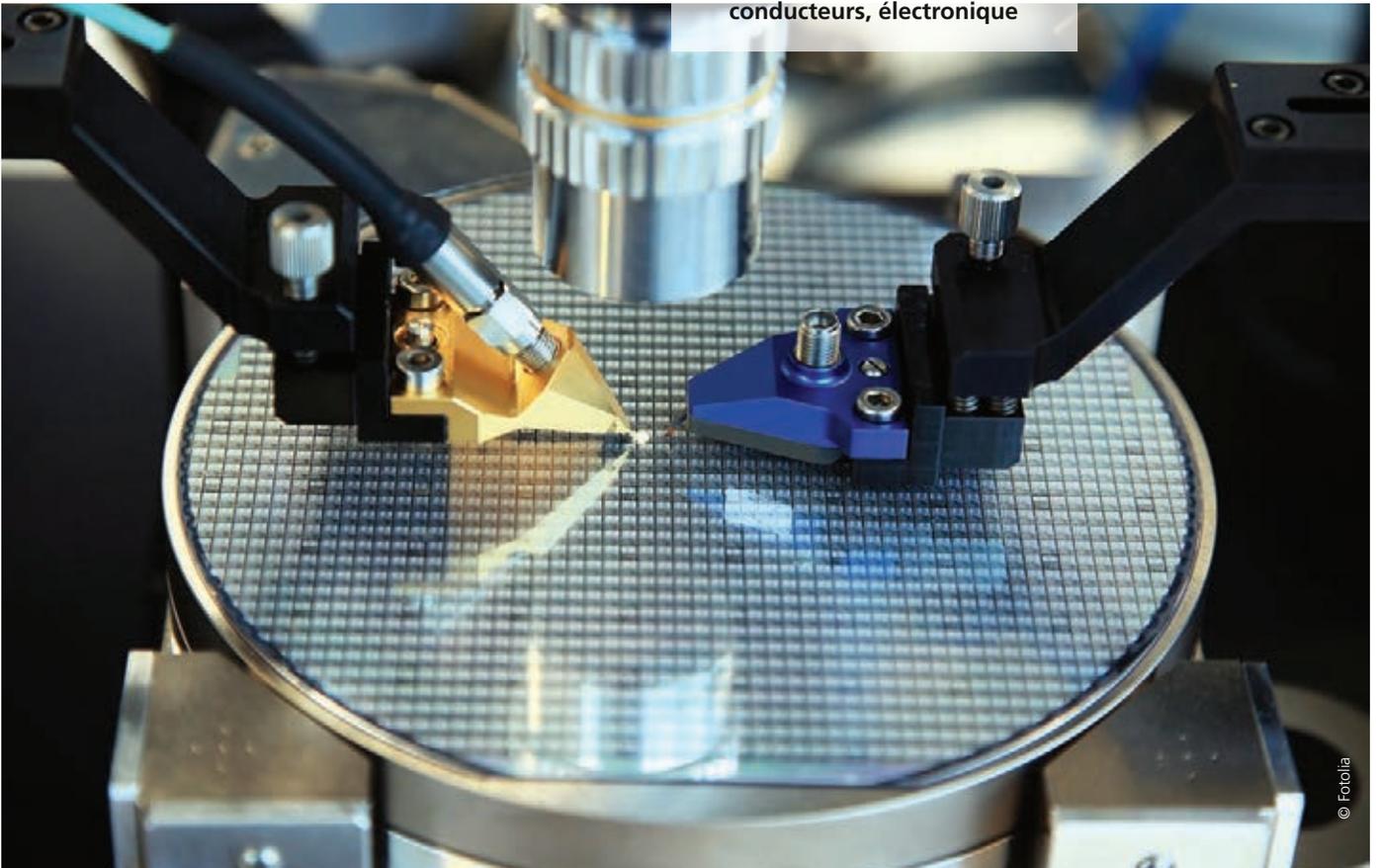
46 Nanoélectronique

Loisirs & culture
Énergie, Mobilité, NUMÉRIQUE
Environnement, Habitat, Santé et bien-être, Sécurité
Alimentation

► **Correspond à
une technologie clé 2015**

MOTS CLÉS

Loi de Moore, More than Moore,
intégration 3D, photonique,
Internet des Objets, semi-
conducteurs, électronique



© Fotolia

Définition et périmètre

La nanoélectronique fait référence à la **miniaturisation (Loi de Moore) à un niveau nanométrique et la diversification (« More than Moore ») des composants et des systèmes électroniques.**

Depuis 50 ans, l'industrie électronique a suivi la **Loi de Moore¹ selon laquelle le nombre de transistors contenu dans les circuits double tous les 18 mois, à prix constant.** Cette voie, dite *top-down*, a permis de réduire le plus possible les dimensions des composants électroniques, au point d'atteindre un niveau nanométrique. Soumise à la Loi de Moore, l'industrie électronique, utilise majoritairement du silicium et la photolithographie pour graver les transistors.

Des solutions repoussant les limites de la loi de Moore sont néanmoins apparues, contredisant ainsi les prévisions du fondateur d'Intel. Ces technologies de prolongement, qui répondent à une stratégie « **More Moore** », ont permis à des sociétés telles que TSMC de proposer la fabrication de circuit de 20nm et à Samsung, de concevoir des composants de 14nm, les plus petits sur le marché à ce jour. Il s'agit de modifications de la structure des transistors :

- La **technologie FD-SOI** (*Fully depleted silicon on insulator*) développée conjointement par Soitec, STMicroelectronics et le CEA LETI permettant d'améliorer les performances du transistor tout en réduisant, voire supprimant, les effets parasites rencontrés avec le silicium. Le développement de cette technologie est au cœur du projet Nano2017 lancé par le gouvernement en 2013 ;

- De la **technologie FinFet²** mise au point par Intel et utilisée par Samsung, TSMC et Globalfoundries.

En revanche, les difficultés rencontrées au niveau de la poursuite de l'augmentation de la taille des transistors se posent plutôt au niveau de la technologie de fabrication, et en premier lieu de par la limitation liée à la longueur d'onde de la lumière utilisée en photolithographie. Une nouvelle technologie de gravure est ainsi en cours de développement pour remplacer

la photolithographie, ne permettant pas de graver du silicium à une finesse inférieure à 10nm : la **technologie Extreme-UV³**. Cependant, le passage en extrême UV comme les techniques de multi-patterning sont des technologies extrêmement difficiles à maîtriser et renchérissent le coût de production. Plusieurs acteurs mondiaux de la microélectronique, Samsung, Global Foundries, ont confirmé au cours des derniers mois qu'ils estimaient que le nœud 28nm aurait un coût de production moins élevé que les nœuds suivants (14nm et au-delà), ce qui fait pressentir une durée de vie plus longue pour le 28nm, **donc un ralentissement de la loi de Moore.**

En parallèle de la course à la réduction des dimensions, un nouveau champ d'innovation est apparu dans l'industrie des semi-conducteurs face à l'augmentation croissante des besoins du marché en termes d'application. On l'appelle « **More than Moore** ».

On cherche plutôt à intégrer de nouveaux nanocomposants hétérogènes sur une puce pour enrichir les fonctions des circuits, gérer leur complexité croissante et leur permettre de s'adapter à leur environnement : microprocesseurs, micro-capteurs, mémoires statique et dynamique, micro-systèmes électromécaniques (MEMS), interfaces radioélectriques, composants optoélectroniques etc.

Parmi les procédés à l'étude figure l'intégration 3D, c'est-à-dire la conception de puces au sein desquelles les composants sont empilés et non plus seulement mis côte à côte. Cette voie laisse envisager des systèmes complexes plus performants, **moins « encombrants », plus économes en énergie, et surtout moins coûteux une fois les procédés d'industrialisation maîtrisés.**

Pourquoi cette technologie est-elle clé ?

Caractère stratégique

En raison de l'omniprésence de l'électronique dans tous les secteurs de notre économie, la nanoélectronique est stratégique car **sa maîtrise conditionne le positionnement de la France dans de nombreux**

1 – Loi empirique édictée par Gordon Moore, fondateur d'Intel à partir de l'observation d'une tendance

2 – La technologie FinFET consiste à graver des transistors verticaux sur des marches de silicium de quelques nanomètres de hauteur, en 3D et permettant aux transistors d'occuper une moins grande surface et ainsi, de réduire les courants de fuite

3 – La technologie consiste à frapper une cible d'étain sous vide avec un faisceau laser CO₂ de près de 1MW de puissance. Cette frappe pulvérise la cible et provoque l'émission de rayons X sur cette longueur d'onde. Il s'agit alors de récupérer ces rayons X à travers des miroirs et de les diriger sur la plaque de silicium

domaines technologiques clés associés : l'Internet des Objets, les réseaux électriques intelligents, la *Cloud Computing*, etc. Cette technologie, qualifiée de *key enabling technology*⁴, est à la base de la chaîne d'innovation de nombreuses autres technologies telles que l'imagerie médicale, les capteurs ou la robotique.

Son caractère stratégique est aussi et surtout lié à **l'immense potentiel de marché que la nanoélectronique représente de par son important effet de levier sur l'innovation des autres filières** (produits et services de l'information, automobile et transport, santé, etc.). À titre d'exemple, le marché des semi-conducteurs est estimé à 300 milliards de d'euros en 2015⁵ mais son effet de levier sur les autres marchés est extrêmement conséquent (de l'ordre de six fois sa taille sur le seul marché de l'électronique).

Atouts de la France

La France dispose d'atouts lui permettant de se positionner demain en leader dans les technologies nanoélectroniques :

■ **Des centres de R&D de haut niveau** : le site de Crolles (STMicroElectronics), le CEA Leti et l'IRT NanoElec ;

■ **Des entreprises de rang mondial investissant dans la recherche en nanoélectronique** : STMicroElectronics fait partie des 10 leaders mondiaux de fabrication de composants électroniques et est au cœur du programme de R&D Nano2017, au côté du CEA Leti. D'autres grands groupes industriels sont impliqués dans la recherche et le développement de la nanoélectronique, à l'instar de Gemalto, *leader* mondial de la sécurité numérique. Alcatel Lucent et Thalès ont également à ce titre créé le **laboratoire III-V Lab**, rejoint par la suite par le CEA Leti ;

■ **La France dispose de deux pôles de compétitivité d'envergure mondiale sur la nanoélectronique** :

— **Minalogic**, qui rassemble 198 entreprises, et 13 centres de recherche et universités. Minattec, situé à Grenoble, est un complexe d'innovation unique en Europe et au meilleur rang mondial en micro et nano technologie ;

— **SCS (solutions communicantes sécurisées)**, regroupe 250 adhérents dont 16 laboratoires. Il couvre l'écosystème PACA de la microélectronique, historiquement situé autour d'Aix-Marseille et de Sophia-Antipolis, dont l'expertise en technologies analogiques sans contact et technologies pour la sécurité et la carte à puce, sont reconnus à l'échelle mondiale.

■ **Un soutien des acteurs publics français et européens forts dans ce domaine** : La nanoélectronique figure parmi les priorités de la Commission européenne qui prévoit d'investir jusqu'à 5 milliards d'euros⁶. La France a également introduit cette technologie dans les priorités du plan de la Nouvelle France industrielle⁷ et financé à hauteur de 600 millions d'euros, le **programme Nano2017** dont l'objectif est de faire de la France l'un des trois premiers du programme de recherche européen Horizon 2020.⁸ Ce plan s'inscrit pleinement dans la perspective de la **stratégie européenne pour la micro-nanoélectronique**, mettant l'accent sur les trois pôles majeurs de Crolles, Dresde et Louvain⁹.

Liens avec d'autres technologies clés

La nanoélectronique est liée à **toutes les technologies clés à l'horizon 2020 intégrant des composants électroniques** :

- L'Internet des objets ;
- Capteurs ;
- Réseaux électriques intelligents ;
- Robotique autonome ;
- Supercalculateurs ;
- Intelligence Artificielle ;
- Dispositifs Bio-embarqués ;
- Technologies d'imagerie pour la santé ;
- Systèmes embarqués sécurisés et sûrs ;

6 – Commission Européenne, « Stratégie européenne en matière de composants et systèmes micro-nanoélectroniques », Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, Bruxelles, 23 mai 2013

7 – Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du numérique, *Les 34 plans de la nouvelle France industrielle*, 2013

8 – Direction Générale des Entreprises, « Le programme Nano 2017 »

9 – *Le programme Nano 2017*, site Internet de la Direction Générale des entreprises

4 – Commission Européenne, *High Level Expert Group, on Key Enabling Technologies*, juin 2011

5 – Reuters : *Le marché mondial des semi-conducteurs vu à \$348 mds-Gartner*, 8 juillet 2015

- Infrastructures de 5^{ème} génération ;
- Solaire Photovoltaïque ;
- Authentification forte.

Le développement de la nanoélectronique n'influencera pas seulement ces technologies mais un ensemble beaucoup plus vaste, dans de très nombreux domaines.

Les marchés

La nanoélectronique constitue un **marché majeur et très attractif qui concerne tous les secteurs de**

l'économie. En effet, omniprésents dans notre quotidien, les composants microélectroniques régissent nos ordinateurs, permettent les services sans contact, déterminent la qualité des télévisions, etc. Le développement de la nanoélectronique porte donc en elle une révolution dans de très nombreux domaines d'applications de la santé, à l'énergie, l'environnement à la sécurité.

Le document MASRI10, publié par la *Joint Undertaking ECSEL* en 2014, propose des données de marché par domaine d'applications pour éclairer les enjeux financiers de la nanoélectronique :

Marchés (non-exhaustif)	Chiffre d'affaires global
Automobile et transport Automotive semiconductors (2015)	28,7 Mds \$US
Communication et usages numériques Communications chips (2015F) Computer chips (2015F) Optical components (2015F) Siicon photonics (2015F) Set-Top Box (2013) Transceiver (2015F) Power amplifler (2015F)	133,9 Mds \$US 117,5 Mds \$US 7,3 Mds \$US 2 Mds \$US 22,2 Mds \$US 12,1 Mds \$US 8,8 Mds \$US
Efficacité énergétique Power semiconductors (2015F)	15,6 Mds \$US
Santé et vieillissement Medical imaging equipment (2015F)	28,3 Mds \$US
Equipement, matériel et production Semiconductor equipment (2012)	39 Mds \$US
F : « Forecast », données prévisionnelles	

Source : ECSEL, MASRIA, 2014

La demande soutenue de semi-conducteurs pour les smartphones et pour l'automobile sera portée par l'explosion de l'Internet des Objets (IoT), qui offre des perspectives de croissance optimistes pour les acteurs du marché à horizon 2020 et au-delà. Selon la société d'études Gartner, le marché des semi-conducteurs pour l'IoT représentera près de **45 milliards de dollars en 2020**, contre seulement 10 milliards en 2014. Le marché de l'IoT représentera lui, environ 1700 milliards d'euros en 20211.

L'Europe et la France ont cependant **encore du retard à rattraper** sur le marché de la production de

composants électroniques, largement dominé par les 3 géants américains et asiatiques Intel, TSMC et Samsung. STMicroelectronics, Infineon et NXP, représentent des acteurs européens importants mais détiennent des parts de marché bien inférieures à leur concurrent : 2 % pour STMicroElectronics contre 10 % pour Samsung et 15 % pour Intel (Gartner, 2015). En revanche, la production européenne de composants est très bien positionnée sur les composants pour les marchés industriels : automobile, médical, aéronautique... Cette spécificité peut lui permettre d'améliorer sa position dans les années à venir, car ces marchés connaissent une plus forte croissance que les marchés télécom plus matures.

Les investissements dans des projets de recherche - au niveau européen, avec le programme Horizon 2020, et en France avec le projet Nano2017 financé dans le cadre du programme d'investissements d'avenir -

10 – ECSEL Joint Undertaking, MultiAnnual Strategic Research and Innovation Agenda, 2014

11 – Données IDC, 2015

montrent **les ambitions fortes de l'Europe et de la France de devenir leader mondial en production de composants nanoélectroniques.**

Les défis technologiques à relever

Les défis liés à la Loi de Moore

La miniaturisation des composants au-delà de 10nm pose des défis technologiques importants : comment graver sur des surfaces nanométriques des composants en limitant au maximum les courants de fuite et à des coûts toujours plus faibles ?

La recherche en nanoélectronique s'oriente vers différentes alternatives à la loi de Moore, alternatives « *Beyond CMOS* » qui visent à explorer d'autres possibilités d'exploitation de matériaux autres que le CMOS¹² :

- **La spintronique**, utilisant le spin des électrons pour le stockage d'information (MRAM) ou bien dans la radiofréquence (oscillateurs GHz) ;
- **La photonique**, utilisant la lumière (photon) pour coder l'information pour des hautes fréquences ;
- **L'auto-assemblage de la matière (voie *bottom-up*)** : au lieu de construire un circuit et d'y graver des nano-composants, la voie *bottom-up* cherche à assembler des molécules entre elles pour former des nano-composants. Cette alternative reste pour l'instant dans une démarche très exploratoire ;
- **Le transistor à un électron** : les applications potentielles sont des électromètres miniatures (détection ultra-sensible de la charge), des mémoires, des circuits logiques, etc. Le transistor à électrons est surtout efficace à basse température (blocage de Coulomb) mais des systèmes de ce type peuvent être appliqués à la radio fréquence ;
- **L'effet tunnel résonnant** : mis en pratique au sein de diodes ou de transistors. Ce sont des dispositifs permettant de réaliser des oscillateurs, des circuits logiques, des mémoires ;
- **L'électronique moléculaire** visant à la réalisation de dispositifs électroniques (comme un processeur par exemple) constitués soit d'une seule molécule regroupant l'ensemble des fonctions requises avec une approche intégrée, soit de composants moléculaires élémentaires (une ou quelques molécules) connectés

entre eux par des électrodes dans une approche dite hybride ;

■ **L'utilisation du graphène, un nouveau matériau qui remplacerait le silicium.** Ce matériau pourrait révolutionner l'électronique car les électrons se déplacent sur le graphène à une vitesse 150 supérieur que sur du silicium. Par ailleurs, un transistor de graphène s'échauffe peu. Cette alternative, qui ne fonctionne qu'à basse température, reste pour l'instant dans une démarche très exploratoire.

Ces différentes options sont encore à des stades amonts, et ont toutes comme objectif de lever les défis liés à la puissance et la vitesse de calcul des processeurs.

L'intégration de technologies hétérogènes (*More than Moore*)

Depuis 50 ans, l'industrie du semi-conducteur suit la loi de Moore. Aujourd'hui, l'enjeu est de diversifier le contenu des puces en intégrant différents composants hétérogènes. Le nouveau pan de la recherche en nanoélectronique se trouve donc confronté à un défi de taille : comment intégrer de façon optimale des composants de nature hétérogène (analogique et numérique), tels que des MEMS, capteurs et actuateurs, etc. ? L'intégration de composants de nature hétérogène à une échelle nanométrique pose également la question de la consommation d'énergie. L'un des principaux défis en nanoélectronique est en effet de consommer peu d'énergie (donc de limiter au maximum les courants de fuite). Cette problématique est cruciale pour le développement de l'ensemble des technologies de la nanoélectronique.

Les défis commerciaux et d'usage à relever



Parvenir à proposer des puces électroniques (avec des nano-composants) à bas coût est un défi de taille. La production de nano-composants nécessite en effet

12 – CEA, *Le Nanomonde*, 2008

d'utiliser des équipements et infrastructures dont le coût est significatif. L'investissement dans de telles infrastructures est très élevé, et par conséquent, écarte de fait les acteurs n'ayant pas les capacités de production et les parts de marché suffisantes. À titre d'exemple, Samsung, devrait investir 14,7 milliards de dollars en 2015 dans les semi-conducteur¹³. De tels investissements sont possibles pour Samsung car il se positionne en numéro deux mondial sur le marché des semi-conducteurs. Le positionnement de la France en leadership sur ce marché doit donc passer par des **stratégies d'alliance entre les acteurs français de l'industrie des semi-conducteurs (producteurs et bénéficiaires)**, notamment au niveau européen et international pour partager les coûts d'investissements des futures usines de production de composants. L'absence d'une telle stratégie ou d'aide publique forte dans le secteur ferait courir le risque à STMicroElectronics, de devenir « *fabless* ¹⁴ c'est-à-dire de ne plus être capable de produire des composants.

Les enjeux réglementaires

Le développement de la nanoélectronique n'est **pas soumis à des contraintes réglementaires majeures** à l'heure actuelle.

La nanoélectronique se distingue en effet des nanotechnologies et nanomatériaux qui fabriquent des composants chimiques pour lesquels les potentiels risques sanitaires et environnementaux font l'objet de débats et réflexions réglementaires spécifiques. À l'échelle européenne, c'est le règlement Reach, relatif à l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques, qui encadre ainsi le développement des nanomatériaux et nanotechnologies.

Le semi-conducteur n'utilisant pas de nano-objets libres dans ces procédés de fabrication il n'est pas impacté par le règlement Reach. En revanche, un certain nombre de substances visées par la réglementation Reach et exploitées par l'industrie du semi-conducteur font régulièrement l'objet de volonté de restriction voire d'interdiction, que ce soit dans les substrats (Arsenic de Gallium notamment) ou les solvants utilisés dans les processus de fabrication (notamment les substances fluorées).

13 – « Samsung, toujours champion des investissements dans les semi-conducteurs », Usine-Digitale.fr, 23/04/2015

14 – « STMicro, fabless dans cinq ans ? » L'usineDigitale.fr, 07/03/2013

Analyse AFOM

ATOUTS

Deux pôles de compétitivité mondiaux : Minalogic, SCS

Un écosystème d'innovation de haut niveau : CEA LETI, IRT NanoElec, Minatec, Alcatel Thales III-V Lab, CNRS et INRIA

Un soutien politique fort en faveur du développement de la nanoélectronique à travers les plans « Nano2017 » et de la Nouvelle France Industrielle

Présence d'un fabricant de semi-conducteurs de rang mondial : ST MicroElectronics, inventeur d'une technologie More Moore, le FD-SOI

Présence d'un fabricant de substrats de rang mondial : SOITEC, inventeur du SOI

Un écosystème sur le sans contact et la sécurité reconnu mondialement

FAIBLESSES

Faible capacité d'investissements des industriels (ST MicroElectronics) comparé aux acteurs américains et asiatiques

Nombre d'acteurs français peu élevé

OPPORTUNITÉS

Un marché mondial estimé à 326 milliards d'euros en 2016 pour les semi-conducteurs

Des débouchés très importants à venir dans l'Internet des objets dont le marché est estimé à 1700 milliards d'euros en 2020

MENACES

Domination des acteurs américains et asiatiques

Risque pour STMicroElectronics de devenir « *fabless* » en l'absence de forts investissements dans de nouvelles infrastructures

Facteurs clés de succès et recommandations

L'écosystème Grenoblois (site de Crolles, Mina-logic, Kalray, ST Microelectronics, IRT NanoElec, CEA, etc.) fait aujourd'hui de la France un leader mondial en recherche sur la nanoélectronique. Néanmoins, sur le plan industriel, la faible capacité d'investissement de ses entreprises (notamment ST) positionne la France en retard par rapport à ses concurrents américains et asiatiques (Taïwan, Chine, Corée, Japon). Le rôle de plus en plus déterminant joué par la nanoélectronique dans l'innovation de nombreuses branches industrielles, et le potentiel de marché immense que cette technologie représente lui donne un caractère fortement stratégique pour la France.

Pour acquérir une position de leadership mondial au niveau industriel et maintenir son leadership dans la recherche, il est donc essentiel de :

■ Continuer à promouvoir les interactions et les partenariats entre les acteurs publics et privés de recherche afin de favoriser un transfert rapide des

technologies. La coopération entre STMicroelectronics et le CEA LETI sur les technologies de production en FD-SOI (*fully depleted silicon on insulator*) a démontré la force du modèle français qui dispose aujourd'hui de compétences uniques au monde ;

■ Augmenter de façon considérable les capacités d'investissements des acteurs du secteur afin de construire des usines de pointe à travers :

— La mise en place d'alliances stratégiques entre grands industriels fabricants et industriels intégrateurs de semi-conducteurs. La création d'un consortium d'acteurs réunissant investisseurs/intégrateurs et fabricants pourrait être une solution pour financer les usines du futur ;

— Un soutien public à l'investissement, comme ce fut le cas pour Nano2017. L'aide de l'État doit néanmoins rester un apport à la marge car elle ne constitue pas une solution de long terme pour garantir la pérennité de l'industrie française de nanoélectronique.

Acteurs clés

Organismes de recherche et de formation

Parmi les principaux acteurs français de la recherche, on compte notamment : IRT NanoElec, INRIA, CEA Leti, Alcatel Thales III-V Lab, CNRS (LAAS, NEEL, IEMN, LPN, IMS, UMP), Minatec, Institut d'Electronique fondamentale de l'Université Paris Sud, ENS Cachan, Université Joseph Fourier, INP de Grenoble, ESIEE.

Grands groupes

Les principaux groupes français dans le champ de la nanoélectronique sont : STMicroelectronics, Thalès, Alcatel Lucent, Gemalto.

Entreprises de taille intermédiaire (ETI)

SOITEC, ALTIS, Trixell.

Start-up et PME

La France possède un écosystème de start-up et de PME dans le domaine de la nanoélectronique qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur : Riber, Semco Engineering, IBS, Magillem Design Services, Docea Power, Tronics Microsystems, Kalray, MicroLed, Tiempo, Isorg, Primo 1D, Exagan, Vesta System, etc.

Organismes de soutien et d'interface

Ces entreprises sont soutenues et accompagnées par des structures de l'écosystème de l'innovation : Mina-logic, SCS, S2E2, IRT Nanoelec, CAPTRONIC, C'Nano Paca (centre de compétences en nanosciences et nanotechnologies), Fondation Nanosciences (réseau thématique de recherche avancée).

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	

Acteurs clés :

Entreprises	Alcatel Thalès III-V Lab, Alcatel-Lucent, Alstom Hydro Power, Bouygues Construction, EDF, Electropôle - Schneider Electric, Enerbee, Exagan, Gemalto, Genel, Isorg, Kalray, MicrooLed, Mirsense, Primo 1D, PV Alliance, Radiall, Soitec, STMicroelectronics, Thales Research and Technology, Tiempo, Trixell, Tronics Microsystems, Vesta System ...
IRT, ITE, IHU	IRT NanoElec...
Instituts Carnot	CEA LETI, INRIA, LAAS CNRS ...
Autres centres de recherches	ENS Cachan - Département électronique électrotechnique automatique (EEA), Institut d'Electronique fondamentale de l'Université Paris Sud, IEMN Lille, Grenoble INP, LPN, MINATEC, NEEL Université Joseph Fourier - Master EEATS...
Pôles de compétitivité	Minalogic...
Autres (clusters, associations, fédération professionnelles, réseaux d'entreprises)	C'Nano PACA, Fondation Nanosciences, Optic Rhône Alpes...