

VERS UNE METROLOGIE INTÉGRÉE POUR L'ENVIRONNEMENT ET L'INDUSTRIE

*Série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et
technologies sous-jacentes »*

À propos de la série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes » : issus du séminaire 2024 de l'Académie des technologies, les avis de cette collection proposent une liste (non exhaustive) des technologies et écosystèmes industriels à développer dès maintenant, pour assurer à la France (et l'Europe) la réindustrialisation, la souveraineté et la décarbonation de son économie à l'horizon 2035-2050.

En bref

La métrologie, ou « science de la mesure », est essentielle pour la maîtrise des enjeux environnementaux (suivi de la qualité de l'eau, de l'air et des sols) mais également pour la compétitivité industrielle (efficacité des process, choix de conception, etc.). La France a largement décroché au niveau mondial pour la production d'instrumentation de métrologie, tout en conservant une bonne place sur les services analytiques associés. L'interprétation des données, où se situe une bonne partie de la valeur ajoutée d'aujourd'hui et de demain, est aussi à considérer en notant que chaque fois qu'apparaissent de nouveaux champs de mesures s'ouvrent de nouvelles perspectives de domaines potentiels de ruptures technologiques. Les synergies entre ces trois sous-domaines (l'instrumentation, la mesure, l'interprétation) est importante, ce qui doit conduire la France à se positionner sur l'ensemble de la chaîne ou au moins sur certaines technologies et usages de rupture qui restent à identifier. L'État pourrait soutenir la R&D et les innovations sur ces technologies et se positionner pour les protéger ; valoriser l'écosystème métrologique, insuffisamment connu, pour l'aider à prendre des positions significatives. L'échelon européen, vu le bon positionnement allemand traditionnel sur l'instrumentation, doit être pris en compte et pourrait être un levier de progrès. Cet avis préliminaire est destiné à attirer l'attention sur un écosystème industriel important ; il sera nécessairement complété par un travail plus complet d'ici 2026 permettant de cibler mieux les technologies et secteurs où il pourra être suggéré un effort particulier à faire. En effet le domaine est large et, pour être efficaces, il faudra surement être sélectifs en fonction de l'impact potentiel d'une telle politique.

1. Face aux grands enjeux du XXI^e siècle

La métrologie, science de la mesure, est un outil central de compréhension, d'innovation et de conduite. Il y a une sorte d'aller-retour entre les progrès de la métrologie et les progrès dans la maîtrise du domaine, comme entre l'imagerie médicale et la médecine. Être faible en métrologie, c'est courir le risque d'être faible en tout.

La métrologie environnementale n'échappe pas à cette vision : elle est donc indispensable à la compréhension de l'impact qu'a, et que va avoir, le changement climatique, indispensable pour accompagner la transition environnementale en cours (mesures des émissions, des émissions fugitives, de leur réduction). Elle joue en particulier un rôle dans l'efficacité industrielle, en lien avec les mesures des émissions et plus directement pour les process.

Bien mesurer, bien détecter, sont les premières étapes pour la (re)construction d'un environnement de qualité. La métrologie est ainsi centrale pour l'arbitrage des conflits et l'attribution des émissions/contaminations (Environmental Forensics).

En matière de biodiversité, les nouvelles techniques à base d'ARN/ADN par exemple pourraient aider à mieux définir la qualité des eaux continentales (celle actuelle et celle souhaitable) en mesurant les impacts sur le biote des pollutions de tout type.

Les enjeux concernent aussi l'agroalimentaire ou la pharmaceutique : la détection précoce de contaminants (microalgues, etc.) permet de réagir suffisamment vite pour préserver des récoltes, des stocks.

Bien qu'elle ne soit pas suffisamment visible dans les politiques publiques, la métrologie est un élément essentiel pour la souveraineté : au cœur des process industriels, l'importation de technologies étrangères accentue la dépendance dans les choix de conception, de fonctionnement des usines, et présente un risque en cas de crise géopolitique. En particulier, la France a depuis un certain temps accumulé du retard sur le génie des procédés industriels (l'intégration entre la paillasse et l'échelle industrielle) : l'analyse basée sur des mesures fiables en est l'une des clés, avec la simulation prédictive qui lui est liée.

Plus généralement, maîtriser la mesure (et la production des capteurs associés) permet de peser sur le choix des normes et standards, mais aussi de proposer des services à haute valeur ajoutée (comme pour les modélisations du sous-sol dans le Oil & Gas), avec la maîtrise de la chaîne de valeur depuis les capteurs jusqu'aux services.

Le présent avis a vocation à définir de premières recommandations sur cet écosystème méconnu, sans structuration transversale, et peu visible dans les politiques publiques. Il devra ensuite être spécifié par domaines et technologies ; il n'est donc qu'une première étape en ce sens.

2. Le positionnement mondial de la France et de l'Europe

La France compte des leaders mondiaux en services métrologiques ou analytiques, comme Eurofins¹ ou SGS (société suisse mais très présente en France et historiquement française). Les services de mesures nécessitent souvent moins de coûts de R&D et offrent une croissance plus rapide en profitant des opportunités de la mondialisation. En contrepartie de quoi, l'usage des mesures et leur compréhension sont consommateurs d'études et de développements applicatifs, supports de services plus sophistiqués.

¹ Fondée en 1987 à Nantes par Gilles Martin, l'entreprise compte 62 000 employés, +900 laboratoires et est présente dans 62 pays. <https://www.eurofins.com/about-us/our-business/eurofins-group-overview/>

Les barrières à l'entrée de nouveaux joueurs sont néanmoins plus faibles que celles des instruments en eux-mêmes, protégeables par des brevets.

Concernant l'industrie des appareils de mesure (en amont), la France a été bien placée jusqu'à la fin du siècle dernier. Le rachat systématique de compagnies françaises innovantes a, petit à petit, réduit la visibilité française dans le domaine. Le dernier exemple tout récent est le rachat de Stilla Technologies². Quelques pépites subsistent comme ENVEA (ex-Environnement SA) mais qui n'ont plus la taille critique. Le monde académique (de la chimie en particulier) s'est progressivement désengagé des développements « amont » dans le domaine et ne subsistent plus que quelques lieux préservés (l'ISA à Lyon, l'IPREM à Pau, l'EPOC à Bordeaux...).

En revanche, l'Allemagne est bien positionnée sur les appareils de mesure. Elle est un peu moins performante sur les services (la société familiale allemande Wessling au développement similaire à Eurofins vient d'être rachetée par la compagnie australienne ALS Limited).

En aval de l'industrie de la mesure et des services métrologiques se situe la capacité à interpréter les données, via l'IA, la modélisation et la simulation, un secteur en émergence où l'Europe, avec l'Allemagne et la France, pourrait se positionner. Il s'agirait de se placer sur des marchés mondiaux en forte croissance (tirés par l'Asie notamment) et à forte valeur ajoutée. Être bien positionné dans les trois domaines (appareillage, mesure, interprétation) créerait des synergies utiles pour occuper une position dominante sur les marchés. Les sociétés de service sont ici en position de force, car pouvant proposer des services d'interprétation liés à la simple fourniture de ces données. Mais attention : les services créent de l'emploi essentiellement à l'étranger, là où l'appareillage et l'interprétation peuvent contribuer à créer des emplois qualifiés en France.

Notons que l'interprétation des données passe par une phase de validation indispensable : la fiabilité, la répétabilité et le traçage sont des éléments capitaux. De ce point de vue il existe en France une compétence reconnue au sein du LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais) ou de l'Afnor, mais aussi à travers des acteurs dispersés que sont les centres techniques de branches. Enfin, en soutien aux analyses réglementaires et au rapportage, il existe un réseau, intitulé AQUAREF³, regroupant l'Ineris, le BRGM, l'Ifremer, l'Inrae et le LNE, qui joue un rôle de laboratoire de référence pour la surveillance des milieux aquatiques (échantillonnage, méthodes de prélèvement et d'analyse). Existant depuis 2007, ce réseau mériterait d'être mieux soutenu.

Une mission en Chine a permis de constater que ce pays est pour le moment encore peu présent dans les technologies métrologiques ou de chimie analytique, et à fortiori dans l'interprétation, mais cela pourrait changer rapidement.

3. Les technologies clés à horizon 2035-2050

Les technologies clés de la métrologie sont nombreuses, elles englobent :

- la mesure en temps réel pour l'analyse, le suivi, l'alerte et le pilotage : capteurs chimiques, physiques, biologiques. Il s'agit souvent d'analyser un seul composant à des niveaux de plus en plus petits (liés aux contraintes environnementales croissantes), ou parfois un ensemble de composants de même type. En matière de biologie, le temps de réponse de la mesure (délai entre prélèvement et résultat) est critique ;

² Voir l'article des Échos en date du 17 février 2025 : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/pharmacie-sante/test-pcr-laméricain-bio-rad-rachete-son-concurrent-francais-stilla-technologies-2149245>

³ <https://www.aquaref.fr/>

- les multi-capteurs permettant de caractériser et de faire de la modélisation prédictive des processus (avec assimilation de données), le couplage d'essaims de capteurs avec des technologies à base d'intelligence artificielle (IA) ;
- les systèmes distribués permettant de faire des mesures multipoints (fibres optiques et systèmes OTDR – Optical Time Domain Reflectometer),
- les mesures participatives et citoyennes (mesures décentralisées), ce qui sous-entend souvent des capteurs low-tech et low-cost. Le projet TERRA FORMA est un exemple intéressant de mesures distribuées⁴ ;
- les mesures multiples de nombreux paramètres, avec imagerie : tri, chaîne de production, contrôle de fabrication via par exemple la spectrométrie de fluorescence X⁵ ou d'émission atomique de plasma induit par laser (dit LIBS), pour le tri/recyclage ;
- la mesure déportée : spectroscopie, LiDAR, télédétection aéroportée ou satellitaire, mais aussi la révolution des systèmes miniaturisés portés par drones, métrologie, mesure et caractérisation 3D multi-échelles ;
- les appareillages pour la chimie analytique couplés à différents types de spectroscopie : haute résolution, extrême sensibilité, capacité à analyser dans des matrices très complexes) ou appareillages pour la métrologie de précision arbitrale.

L'innovation dans le domaine de la métrologie réside moins dans l'apparition de techniques inconnues que dans la greffe de technologies existantes et de leur utilisation dans de nouveaux contextes. Si la France est plutôt mal placée sur des technologies comme la spectrométrie de masse (suite à de nombreux rachats), elle peut proposer des innovations utiles sur certains sous-domaines, qui restent à identifier précisément.

Deux domaines de technologies basées sur la biologie et microbiologie seraient ainsi, par exemple, à suivre car pouvant introduire des méthodes d'analyses environnementales et sanitaires en rupture :

- d'une part, l'EDA (Effect Directed Analysis) qui détecte des effets biologiques via des récepteurs sur lesquels se fixent les composants chimiques responsables de ces effets, qui sont ensuite élués puis identifiés par chromatographie et spectrométrie de masse ;
- d'autre part, la PCR⁶ digitale qui permet une quantification absolue des acides nucléiques sans avoir recours à des références ou à des courbes d'étalonnage. La méthode, qui divise l'échantillon en le répartissant dans des milliers de chambres de réactions individuelles, présente une grande tolérance aux inhibiteurs, une précision supérieure de la quantification, une sensibilité accrue et une grande reproductibilité par rapport à la PCR classique.

Pour permettre une analyse plus approfondie du sujet par l'Académie des technologies, Il sera intéressant et nécessaire de rencontrer Stilla Technologies sur la PCR digitale ou les entreprises qui se lancent dans le service et l'interprétation des données sur de nouvelles méthodes analytiques (par exemple IAGE pour l'utilisation de la PCR digitale dans le domaine de l'environnement), ainsi que les laboratoires académiques, ou encore le réseau NORMAN⁷, et les entreprises qui investissent aujourd'hui dans les technologies de mesure.

4. Les recommandations de l'Académie des technologies

Vu les synergies sur l'ensemble de la chaîne de valeur, la France doit se positionner au-delà des seuls services métrologiques, vers l'amont (les appareils) et vers l'aval (l'interprétation des données), où se situe une bonne part de la valeur ajoutée. La réflexion peut être menée au niveau européen, mais la

⁴ <https://terra-forma-web.osug.fr/-Le-projet-tf->

⁵ Quand les rayons X frappent l'échantillon, ils interagissent avec les atomes de l'échantillon. Ils émettent alors des rayons X uniques à chaque élément, et donc caractéristiques.

⁶ Pour Polymerase Chain Reaction

⁷ <https://www.norman-network.net/>

France doit rester vigilante, afin de ne pas se contenter du rôle d'« apporteur d'affaires » aux autres pays, via sa force sur les services. Il faut donc en particulier :

- étudier la possibilité de soutenir le déploiement d'une filière de production des capteurs en complément de la fourniture de service ;
- susciter le développement de services à haute valeur ajoutée incluant des modélisations prédictives (impacts, extension des effets, variabilité, efficacité des mesures d'atténuation ou d'adaptation) – à l'image de ce qui se fait dans le secteur du Oil & Gas où certaines entreprises françaises sont très performantes (Viridien par exemple).

Le rôle de l'État serait de :

- relancer l'intérêt pour l'« écosystème métrologie » en créant des événements, en mettant en lumière les acteurs publics impliqués dans la métrologie (LNE, Afnor...), les acteurs sectoriels, les entreprises et les startups du secteur ;
- dans un premier temps, établir un diagnostic sur les instrumentations de métrologie ; en particulier, d'avoir un œil sur les différentes startups françaises dans ces domaines, comme Stilla Technologies (instrument de PCR digitale, déjà en cours de rachat) et IAGE (développement de l'interprétation et de l'application de la PCR digitale dans l'environnement) pour identifier les technologies de rupture ;
- selon les résultats des diagnostics, envisager le financement d'un programme coordonné de R&D sur les EDA et les PCR digitales (performance, compréhension des avantages et limites, applications), via des appels à projets par exemple ;
- contribuer à renforcer le lien entre l'amont (développement de méthodes, innovation en instrumentation) et l'aval utilisateur des méthodes, très bien représenté par des entreprises françaises, avec de gros marchés potentiels (de plusieurs dizaines de milliards d'euros) ;
- développer la culture métrologique autour des projets et actions de « métrologie participative », ou "citizen metrology", La multiplication des actions de métrologie participative, quels qu'en soient les objectifs, peut venir conforter la culture métrologique générale et favoriser tant la richesse du débat public sur les thèmes précités que l'acceptation citoyenne des décisions découlant des mesures, pour peu que le développement des littéracies nécessaires soit encouragé (comme, par exemple, le projet fédérateur TERRA FORMA, déjà cité, initié par le CNRS pour construire des observatoires de l'anthropocène).

Auteurs principaux (liens d'intérêts en relation avec le thème le cas échéant) : Diane d'Arras (ancienne Directrice technique et de R&D de Degremont, puis plus récemment de Suez, entreprises concernées par la métrologie. Pas de conflit d'intérêt personnel. Aujourd'hui retraitée) ; Pierre Toulhoat. Les auteurs remercient Manoelle Lepoutre, Thierry Chambolle, Marc Himbert et Alain Bernard pour leurs relectures attentives.

La déontologie académique exige que tout contributeur à l'élaboration d'un rapport n'apporte au collectif que sa seule expertise, en se gardant de promouvoir tout intérêt personnel, institutionnel ou corporatiste. L'indépendance de nos positions est assurée par le caractère collectif de nos travaux. Ce document a été validé par l'Académie des Technologies selon la procédure disponible sur le site de l'Académie.