

Les matériaux avancés : un atout pour une ère verte et numérique

Exploiter l'innovation matérielle pour la souveraineté économique de l'Europe

André Wolf



shutterstock/guteksk7

La transition de l'Europe vers une économie numérique et neutre sur le plan climatique impose de nouvelles exigences non seulement aux processus de production et aux vecteurs énergétiques, mais aussi aux propriétés des matériaux industriels. Contrairement à ce qui se passe pour certaines technologies de traitement importantes, l'UE possède toujours une avance technologique dans de nombreux domaines importants de l'innovation en termes de matériaux. Le développement des matériaux peut donc jouer un rôle clé dans la quête de souveraineté économique de l'Europe. Pour exploiter pleinement son potentiel, les parties prenantes doivent regrouper leurs forces. Avec sa récente initiative sur les matériaux avancés, la Commission esquisse une stratégie de soutien. Cet Input du cep analyse le potentiel d'une stratégie d'innovation axée sur les matériaux et fournit des recommandations pour sa mise en œuvre.

- ▶ L'établissement de réseaux de coopération stables tout au long des chaînes d'approvisionnement est essentiel pour maintenir les atouts de l'Europe en matière d'innovation matérielle. Une priorité à soutenir devrait être la création d'un vivier commun de connaissances numériques qui fasse circuler l'information, promette des économies d'échelle et aide à faire face aux compromis imposés par les exigences matérielles de la double transition.
- ▶ Dans la gestion de ces réseaux, la prise de décision centrale devrait se limiter à la définition des principaux domaines technologiques stratégiques, afin de garantir l'adaptabilité aux évolutions futures du marché. Tout élan visant à intensifier la collaboration interne à l'UE doit être mis en équilibre avec la nécessité de maintenir la concurrence sur le marché intérieur et de protéger les intérêts des petites et moyennes entreprises. Cela devrait impliquer des mesures ciblées telles que des bons ou des fonds de capital-risque public-privé dédiés pour soutenir l'accès des petits acteurs aux réseaux d'innovation à grande échelle.
- ▶ Le domaine de l'innovation en matière de matériaux devrait faire partie intégrante de la stratégie d'ouverture de l'UE sur le monde. La perspective d'une coopération en matière de développement et de normalisation des matériaux représente un atout précieux dans les futures négociations d'accords commerciaux et de partenariats stratégiques avec les pays tiers.

Table des matières

1	Contexte	3
2	Pertinence des matériaux avancés	4
2.1	Catégories.....	4
2.2	Importance économique	5
2.3	Position mondiale de l'UE.....	9
2.4	Défis spécifiques.....	11
3	Les matériaux avancés dans les politiques de l'UE	13
3.1	Stratégies politiques globales.....	14
3.2	Réglementation récente.....	15
3.3	Communication sur les matériaux avancés.....	17
4	Dynamique et moteurs de l'innovation : le cas des nanomatériaux	22
4.1	Définition et champs d'application	22
4.2	Tendances en matière de brevets nanotechnologiques	23
4.3	Les moteurs de l'innovation en matière de nanotechnologies dans l'UE	29
5	Implications politiques	32
5.1	Champs d'action.....	32
5.2	Recommandations.....	33
6	Conclusion	35
7	Annexe.....	37

Table des illustrations

Graphique 1 : Emploi total des producteurs de matériaux avancés en 2020 par pays/région	9
Graphique 2 : Part des entreprises leaders en matière d'innovation entre 2015 et 2020 par pays/région	10
Graphique 3 : Structure de la stratégie de l'UE en matière de matériaux avancés	22
Graphique 4 : Évolution des activités de brevetage des nanotechnologies dans les principaux pays inventeurs dans le monde.....	25
Graphique 5 : Taille moyenne des familles de brevets nanotechnologiques par pays 2005-2020	26
Graphique 6 : Évolution des activités de brevetage en nanotechnologie dans certains États membres	26
Graphique 7 : Intensité de la coopération transfrontalière en matière de brevets nanotechnologiques, par pays	27
Graphique 8 : Degré de coopération interinstitutionnelle en matière de brevets nanotechnologiques par pays	28
Carte 9 : Répartition des demandes de brevet en nanotechnologie par région NUTS-2 (mesure du nombre d'inventeurs).....	29

1 Contexte

Le défi historique que représente le passage vers des processus de production neutres sur le plan climatique est au cœur des débats politiques actuels. Cependant, l'accent mis sur les nouvelles technologies de traitement peut inciter l'Europe à négliger l'importance majeure du rôle des matériaux de production. Historiquement, le développement de matériaux aux fonctionnalités supérieures a été l'épine dorsale de l'innovation industrielle, donnant naissance à de nouveaux produits et marchés et remettant en cause les positions établies. Cela se confirme également dans la phase de transition actuelle. Des technologies telles que l'électrolyse de l'eau, l'électromobilité et la capture du carbone définissent de nouvelles exigences en matière de propriétés des matériaux, telles que la robustesse ou la résistance à la chaleur. La tendance à la personnalisation de masse grâce à des technologies telles que la fabrication additive nécessite des solutions matérielles sur mesure. Du côté de la demande, la sensibilisation accrue aux questions de durabilité a créé de nouvelles exigences en matière de durabilité et de recyclabilité des matériaux, renforcées par des règles relatives à la conception des produits. Le moment est venu de mettre l'accent sur l'innovation en matière de matériaux.

Récemment, la Commission européenne a présenté les principales caractéristiques de sa future stratégie d'innovation dans le domaine des matériaux industriels dans une communication intitulée « *Advanced Materials for Industrial Leadership* »¹. Les matériaux avancés sont des matériaux dont les propriétés innovantes peuvent changer la donne pour les objectifs centraux de la politique économique de l'UE, en particulier la réussite de la transformation verte et numérique. Compte tenu de leur impact fondamental sur la consommation de matériaux et d'énergie des chaînes d'approvisionnement dans leur ensemble, ils peuvent contribuer à surmonter les compromis existants entre les objectifs de durabilité. En raison de la grande importance de la coopération et de l'échange de connaissances dans le développement des matériaux, ils peuvent également fournir un élan important pour progresser dans la mise en œuvre de nouvelles technologies numériques dans le paysage européen de la recherche, en particulier une utilisation ciblée de l'intelligence artificielle (IA).

Dans le même temps, l'Europe est confrontée à une concurrence mondiale féroce dans le développement de matériaux révolutionnaires. Pour résister à des concurrents qui s'appuient en partie sur des subventions industrielles massives, l'Europe doit regrouper ses forces et canaliser les ressources existantes vers des priorités stratégiques. Outre l'objectif de leadership technologique à long terme, cette démarche est également vitale pour la compétitivité de l'ensemble des chaînes d'approvisionnement. Comme il est peu probable que les sites de l'UE soient compétitifs en termes de coûts par rapport aux rivaux d'Asie de l'Est dans un avenir proche, le modèle commercial européen doit reposer sur la définition constante de nouveaux segments de marché. L'innovation en matière de matériaux est un levier essentiel à cet égard.

Cet Input du cep examine le potentiel et les conditions préalables à une stratégie d'innovation de l'UE dans le domaine des matériaux avancés. Il examine l'importance des matériaux avancés pour les tendances générales, les défis existants et le rôle du cadre réglementaire actuel. Dans le cadre d'une analyse empirique propre au domaine des matériaux à l'échelle nanométrique, il identifie les tendances de l'activité d'innovation mondiale et européenne et examine le rôle de la coopération en

¹ Commission européenne (2024a). *Advanced Materials for Industrial Leadership*. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2024) 98 final.

matière de R&D dans la réussite de la recherche. Enfin, il définit des champs d'action clés et formule des recommandations pour la mise en œuvre d'une stratégie d'innovation axée sur la prospective.

2 Pertinence des matériaux avancés

2.1 Catégories

Le groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux manufacturés a élaboré une proposition de définition générale. Il définit les matériaux avancés comme des « matériaux qui sont rationnellement conçus pour avoir des propriétés nouvelles ou améliorées et/ou des caractéristiques structurales ciblées ou améliorées dans le but d'obtenir des performances fonctionnelles spécifiques ou améliorées »². Par conséquent, contrairement aux matières premières naturelles, ils sont toujours fabriqués par l'homme. Ils diffèrent des matériaux déjà présents sur le marché en ce sens qu'ils offrent de nouvelles propriétés utiles ou des propriétés déjà disponibles sous une forme de meilleure qualité. L'innovation technique peut avoir lieu au niveau du produit (conception physique) et/ou au niveau moléculaire (conception chimique)³. La perspective de l'utilisateur est cruciale. L'ensemble des fonctions pertinentes pour l'utilisateur dépend toujours des préférences et des conditions technologiques actuelles. L'attribution de matériaux spécifiques à ce groupe est donc nécessairement fluctuante et sujette à débat.

Dans le cadre d'une « feuille de route matériaux 2030 », une vaste initiative de l'industrie européenne a défini divers domaines d'application pour les matériaux avancés qui démontrent le grand besoin d'innovation en matière de matériaux dans tous les secteurs⁴. Elle distingue neuf marchés d'innovation en matière de matériaux (voir le tableau 1). Actuellement, chacun de ces marchés est caractérisé par une forte pression en faveur d'ajustements structurels provoqués par la numérisation, les politiques climatiques et l'importance accrue des questions de durabilité en général. L'initiative donne des exemples de la manière dont le développement de matériaux avancés peut aider l'offre à répondre à l'évolution des besoins. Les améliorations possibles des produits ne visent pas seulement la durabilité de la production, mais affectent également les étapes de l'utilisation (par exemple la durabilité) et de l'élimination finale (réparabilité, recyclabilité). Des contributions concrètes à l'amélioration du bilan environnemental peuvent être apportées, par exemple, en développant des matériaux plus légers (efficacité matérielle et énergétique accrue) ou des matériaux qui promettent une plus longue durée de vie du produit grâce à une plus grande robustesse. Les matériaux dotés d'interfaces numériques (capteurs) qui permettent un contrôle permanent des propriétés du produit font également l'objet de discussions dans divers domaines d'application (voir le tableau 1). Ils peuvent également servir divers objectifs de durabilité si les informations obtenues sont utilisées pour optimiser l'efficacité de l'utilisation des matériaux. En outre, le développement de nouveaux matériaux pour la fabrication additive de couches a été identifié comme un domaine d'importance intersectorielle.

² OCDE (2023). Description de travail sur les matériaux avancés. Série sur la sécurité des nanomatériaux manufacturés n° 104. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

³ Wessel, J. K. (2004). The handbook of advanced materials : enabling new designs. John Wiley & Sons.

⁴ AMI (2022). [Feuille de route « Matériaux 2030 » - décembre 2022](#). Initiative sur les matériaux avancés.

Tableau 1 : Aperçu des marchés de l'innovation matérielle

Marché	Domaines d'application	Exemples
Santé et médecine	Surfaces et revêtements améliorés de dispositifs médicaux ; Fabrication additive de dispositifs médicaux ; Instruments de surveillance et de diagnostic	Surfaces antibactériennes ; Impression 3D d'implants personnalisés ; Dispositifs portables de surveillance cardiaque
Construction durable	Construction légère ; isolation thermique ; matériaux de construction recyclables et renouvelables ; meilleure protection des matériaux	Mousses composites légères ; Matériaux réfléchissant la chaleur ; Béton biologique ; Revêtements verts
Nouvelles technologies énergétiques	Production d'énergie renouvelable ; stockage de l'énergie ; transformation de la production industrielle à forte intensité énergétique	Revêtements efficaces pour absorbeurs solaires ; nouveaux matériaux pour cathodes ; matériaux poreux pour la capture du dioxyde de carbone
Transport durable	Véhicules à émission zéro ; composants de véhicules légers ; connectivité numérique des véhicules	Matériaux moins chers pour les piles à combustible ; Nouveaux métallo-composites pour les châssis ; Capteurs
Soins à domicile et soins personnels	Produits de nettoyage ; Cosmétiques	Cosmétiques biosourcés ; Surfaces autonettoyantes
Emballage durable	Matériaux renouvelables et recyclables ; contrôle de la qualité des produits ; substitution des substances nocives ; conception des emballages	Sacs biosourcés ; Revêtements barrière ; Capteurs
Agriculture durable	Contrôle de la maturité des plantes ; Contrôle de la séquestration du CO ₂ ; Matériel agricole biodégradable ; Purification de l'eau et de l'air	Films de paillage biodégradables ; Enrobage de filtres ; Capteurs
Textiles durables	Fibres renouvelables ; surfaces textiles durables et économes en ressources ; vêtements intelligents	Fibres de biopolymères ; Textiles à électronique intégrée
Appareils électroniques	Semi-conducteurs ; Infrastructure de réseau 5G ; Appareils intelligents ; Appareils flexibles/extensibles	Supraconducteurs ; matériaux robustes à faible perte pour les émetteurs 5G ; cadres structurels des capteurs ;

Source : AMI (2022) ; représentation propre : AMI (2022) ; représentation propre.

2.2 Importance économique

En tant que domaine technologique, les matériaux avancés sont considérés comme un moteur important de la dynamique générale de l'innovation. Ils sont classés par l'UE comme l'une des six technologies clés génériques (KET), aux côtés de la fabrication avancée, des technologies des sciences de la vie, de la microélectronique, de l'IA et de la sécurité/connectivité⁵. Ces technologies se caractérisent par une intensité de connaissances particulièrement élevée et des cycles d'innovation courts. Elles possèdent également un potentiel particulièrement élevé d'innovations de suivi et agissent donc comme un levier pour établir de nouvelles méthodes de production et de nouveaux marchés. Leur importance systémique résulte tout d'abord de la diversité des exigences en matière de connaissances, qui favorise les approches interdisciplinaires dans la recherche et le développement (R&D). Deuxièmement, les innovations qui en résultent peuvent être utilisées dans de nombreux secteurs. Par conséquent, elles contribuent non seulement à la force d'innovation, mais aussi à la

⁵ Commission européenne (2012). Une stratégie européenne pour les technologies clés génériques - Un pont vers la croissance et l'emploi. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2012) 341 final.

convergence technologique entre les secteurs⁶. La capacité d'absorption des nouvelles technologies s'en trouve renforcée.

Les matériaux avancés remplissent également une fonction spécifique en tant que facilitateurs de la double transition. Ils peuvent répondre aux nouvelles exigences en matière de matériaux qu'entraîne la pénétration du marché par les technologies numériques et propres. La capacité à développer des matériaux sur mesure peut ainsi devenir un goulot d'étranglement pour la mise en œuvre d'innovations de processus. La protection de la propriété intellectuelle dans ce domaine revêt donc une importance stratégique. Dans ce contexte, la Commission a inclus les matériaux avancés comme l'un des dix domaines technologiques dans la liste des technologies critiques publiée dans une recommandation récente⁷. À l'avenir, les investissements étrangers dans l'UE dans ces domaines feront l'objet d'un contrôle accru en ce qui concerne le risque de fuite des connaissances. Le potentiel économique spécifique des matériaux avancés peut être résumé dans les points suivants.

- 1. Création de rentes de marché par le biais d'un saut technologique :** L'utilisation de matériaux avancés dans la production permet non seulement d'améliorer la qualité des produits, mais constitue également la base de produits dotés de nouvelles fonctionnalités. Cela permet aux fournisseurs de créer de nouveaux segments de marché dans lesquels ils peuvent détenir un monopole temporaire, c'est-à-dire jusqu'à ce que de nouveaux concurrents entrent sur le marché. Cette position de monopole est d'autant plus prononcée que les matériaux innovants sont moins substituables aux solutions existantes en termes de propriétés pertinentes pour l'utilisation. De cette manière, les coûts initiaux de développement peuvent être compensés par l'écrémage de la volonté accrue des clients de payer pour des propriétés de produit améliorées. Cela crée des incitations à l'entrée sur le marché et conduit généralement à des rendements décroissants au fil du temps en raison d'une concurrence croissante. À la recherche de nouvelles perspectives de rendement, les entreprises se retrouvent dans une compétition d'innovation continue pour les matériaux de pointe qui détruisent les modèles d'entreprise existants. D'un point de vue dynamique, ce mécanisme de destruction créative représente un élément incitatif important pour une activité d'innovation persistante et donc pour une croissance de la productivité à long terme⁸. Compte tenu de la situation concurrentielle mondiale, un leadership constant dans la conquête de nouveaux segments de marché est d'une importance capitale, en particulier pour les entreprises de l'UE. C'est une condition préalable pour compenser les désavantages structurels de l'Europe en matière de coûts dans des facteurs tels que la main-d'œuvre et l'énergie. La R&D dans le domaine des matériaux avancés est particulièrement prometteuse en raison de son fort potentiel d'innovations de suivi.
- 2. Exploitation des économies de gamme grâce à la multifonctionnalité :** La polyvalence des matériaux avancés apporte également des avantages économiques directs. Elle permet de partager les coûts de R&D entre les produits et donc de réduire la charge des coûts par produit fabriqué. Du point de vue des recettes, cela implique la perspective de rentes de monopole sur des marchés multiples (voir point 1). D'un point de vue dynamique, le succès de l'innovation intersectorielle

⁶ AMI (2023). [Agenda stratégique pour les matériaux](#). Initiative sur les matériaux avancés.

⁷ Commission européenne (2023a). Recommandation de la Commission du 3.10.2023 sur les domaines technologiques critiques pour la sécurité économique de l'UE en vue d'une nouvelle évaluation des risques avec les États membres. COM(2023) 6689 final.

⁸ Aghion, P. et Howitt, P. (1992). A Model of growth through creative destruction. *Econometrica*, 60(2), 323-351.

génère également un potentiel d'innovations de suivi dans plusieurs domaines d'application, ce qui peut renforcer la dynamique générale de l'innovation. Du côté des intrants, l'interdisciplinarité des activités de R&D dans le domaine des matériaux avancés peut renforcer le système d'innovation dans son ensemble en contribuant à l'établissement de réseaux de recherche interdisciplinaires présentant un potentiel élevé de diffusion des connaissances.

3. **Réduction de l'empreinte environnementale tout au long du cycle de vie** : Grâce à leurs véritables propriétés, les matériaux avancés offrent un large éventail de solutions pour améliorer le bilan environnemental non seulement des chaînes d'approvisionnement, mais aussi de l'ensemble du cycle de vie des produits. Cela concerne tout d'abord l'étape de traitement en aval. Les matériaux avancés peuvent remplacer les matières premières obtenues avec des risques environnementaux élevés lors de la production. Deuxièmement, ils peuvent contribuer à améliorer l'efficacité matérielle ou énergétique générale de la production et réduire ainsi les effets environnementaux en amont. Il peut également y avoir des avantages supplémentaires pour l'étape de post-production. Par exemple, l'innovation en matière de matériaux peut contribuer à accroître la durabilité des produits et donc à réduire la nécessité de remplacer les matériaux dans un certain délai. La recyclabilité des produits peut également être améliorée par de nouveaux matériaux, ce qui réduit encore les besoins en ressources. La contribution potentielle est à la fois une réduction des dommages climatiques mondiaux (réduction de l'empreinte CO₂) et une réduction de la pollution locale⁹. Ce dernier point est particulièrement important en ce qui concerne la possibilité de remplacer les matières premières dites critiques par des matériaux avancés. Par exemple, des risques significatifs pour la biodiversité locale et la santé humaine ont été identifiés dans les pratiques minières actuelles pour des matières premières telles que le lithium¹⁰ et les terres rares¹¹.
4. **Faciliter le suivi de la chaîne d'approvisionnement grâce à la traçabilité** : La recherche sur les matériaux peut créer de nouvelles opportunités pour réduire les asymétries d'information existantes sur les voies de production. Par exemple, le marquage individuel peut déjà être assuré pendant la phase de développement grâce à l'utilisation de technologies de vérification numérique (par exemple, la blockchain)¹². Cela peut non seulement améliorer l'échange d'informations entre les acteurs des chaînes d'approvisionnement sur les propriétés des matériaux et contribuer ainsi à l'optimisation des processus de production et de recyclage. Elle crée également une interface pour transmettre des informations sur les lieux et les conditions de production dans les différentes étapes du processus. Cela permet de répondre à la demande croissante des consommateurs en matière de transparence sur la durabilité des chaînes d'approvisionnement¹³. De cette manière, le déploiement des technologies de traçabilité pourrait également soulager les entreprises des coûts administratifs liés aux obligations d'information à long terme.

⁹ Voir AMI (2022).

¹⁰ Kaunda, R. B. (2020). Potential environmental impacts of lithium mining. *Journal of energy & natural resources law*, 38(3), 237-244.

¹¹ Huang, X., Zhang, G., Pan, A., Chen, F. et Zheng, C. (2016). Protéger l'environnement et la santé publique de l'exploitation minière des terres rares. *Earth's Future*, 4(11), 532-535.

¹² Hastig, G. M. et Sodhi, M. S. (2020). Blockchain pour la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement : Business requirements and critical success factors. *Production and Operations Management*, 29(4), 935-954.

¹³ Sesini, G., Castiglioni, C. et Lozza, E. (2020). Nouvelles tendances et nouveaux modèles de consommation durable : A systematic review and research agenda. *Sustainability*, 12(15), 5935.

5. **Réduction des dépendances vis-à-vis des matières premières externes** : Les prévisions annoncent une forte augmentation de la demande mondiale pour quelques métaux rares qui sont actuellement indispensables à la production de technologies stratégiques d'avenir telles que l'énergie éolienne et l'e-mobilité. Leur extraction est concentrée dans quelques pays qui sont des rivaux géopolitiques de l'UE, en premier lieu la Chine¹⁴. Cette situation crée des dépendances unilatérales qui motivent le chantage économique et entraînent des risques considérables en matière d'approvisionnement pour les entreprises de l'UE. Les initiatives européennes de développement de matériaux avancés peuvent permettre de remplacer ces matières premières. En plus d'éviter les dégâts environnementaux liés à l'extraction des matières premières (voir point 3), cela présenterait l'avantage supplémentaire d'éliminer les dépendances externes. La recherche sur les matériaux est donc un élément important sur la voie de l'autonomie stratégique de l'UE.
6. **Une meilleure adaptabilité à l'évolution des préférences des consommateurs et à la personnalisation de masse** : Du côté de la demande, la tendance persistante à l'hétérogénéité des préférences des consommateurs, à la spécificité des groupes et à la personnalisation des produits impose des exigences accrues en matière de flexibilité des processus industriels. La personnalisation de masse, c'est-à-dire la production de produits personnalisés et de services associés à grande échelle, continuera à gagner en importance en tant que concept commercial¹⁵. Elle permet de servir de nombreux segments de marché tout en exploitant les économies d'échelle. En raison de sa polyvalence et de sa rapidité, l'utilisation de la fabrication additive sous la forme de l'impression 3D à l'échelle industrielle peut représenter la solution technologique appropriée une fois que les obstacles actuels à la mise à l'échelle ont été surmontés¹⁶. La disponibilité d'une large gamme de matériaux appropriés (par exemple, polymères, alliages métalliques, composés céramiques) est une condition préalable importante pour élargir la gamme d'applications, améliorer la qualité de l'impression et réduire les coûts des processus de post-traitement nécessaires¹⁷.

En résumé, le développement de nouveaux matériaux avancés constitue une interface importante pour l'UE dans sa phase actuelle de transformation industrielle. Il crée les conditions nécessaires à l'obtention d'avantages technologiques et contribue ainsi à garantir la compétitivité, même en période de pression sur les coûts induite par la transformation. En même temps, il réduit les effets secondaires indésirables de la transformation en renforçant le potentiel d'approvisionnement local. En raison de leur nature intersectorielle, les matériaux avancés offrent également un potentiel d'effets de synergie et renforcent la convergence technologique générale. Cependant, la recherche sur les matériaux se déroule dans un environnement de marché mondial très compétitif.

¹⁴ Wolf, A. (2022). La position de l'Europe sur les matières premières du futur. [Input du cep Nr.11/2022](#).

¹⁵ Karnik, N., Bora, U., Bhadri, K., Kadambi, P. et Dhattrak, P. (2022). Une étude complète sur les tendances actuelles et futures vers les caractéristiques et les facilitateurs de l'industrie 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 27, 100294.

¹⁶ Zhou, L. Y., Fu, J. et He, Y. (2020). Une revue des technologies d'impression 3D pour les matériaux polymères souples. *Advanced Functional Materials*, 30(28), 2000187.

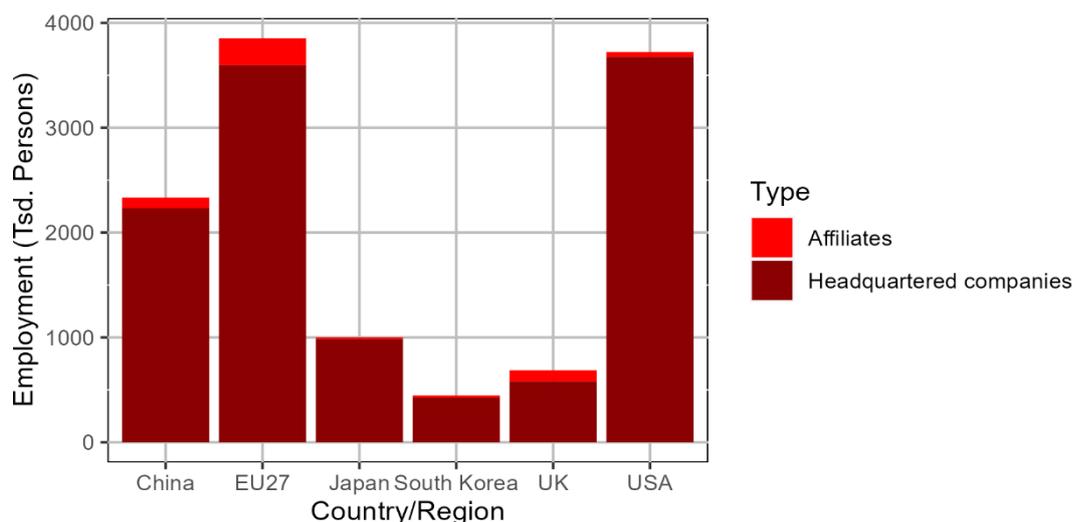
¹⁷ Singh, S., Ramakrishna, S. et Singh, R. (2017). Questions relatives aux matériaux dans la fabrication additive : A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185-200.

2.3 Position mondiale de l'UE

La nature des matériaux avancés étant un vaste segment transversal, il est difficile de déterminer la position de chaque pays ou région sur le marché. Aucune statistique industrielle publique ne peut être utilisée. Une analyse des flux commerciaux par produit n'est pas non plus très précise, car la part des matériaux avancés dans les différents groupes de produits est fluctuante et peut difficilement être définie de manière objective. L'analyse peut également commencer au niveau de l'entreprise en analysant le succès général sur le marché des entreprises dont le modèle d'entreprise est fortement basé sur le développement de matériaux avancés. Van de Velde et al. (2024) ont adopté cette approche dans leur dernière analyse de marché¹⁸. Ils identifient un total de 56 355 entreprises actives dans ce domaine dans le monde entier. 29,3 % de ces entreprises sont basées dans l'UE des 27. C'est un peu moins que les États-Unis, le plus important site mondial, où environ une entreprise mondiale sur trois est basée.

Des différences régionales peuvent également être observées dans la structure de propriété. Environ 85 % des entreprises de matériaux avancés basées dans l'UE sont des entreprises ayant leur siège social, c'est-à-dire des entreprises dont le siège se trouve dans l'UE. Cette proportion est nettement plus élevée qu'aux États-Unis (69 %) et au Royaume-Uni (64 %). Cela indique que les entreprises indépendantes basées dans l'UE jouent un rôle relativement important par rapport aux filiales d'entreprises multinationales. D'autres indications sont fournies par les chiffres cumulés de l'emploi dans les entreprises. Selon les données de Van de Velde et al. (2024), environ 3,9 millions de personnes étaient employées dans des entreprises de matériaux avancés dans l'UE en 2020, soit un peu plus qu'aux États-Unis et nettement plus qu'en Chine (voir figure 1). Les entreprises ayant leur siège social représentaient 93 % de la main-d'œuvre de l'UE. En termes d'emploi, les entreprises ayant leur siège sont donc en moyenne plus grandes que les entreprises affiliées.

Graphique 1 : Emploi total des producteurs de matériaux avancés en 2020 par pays/région

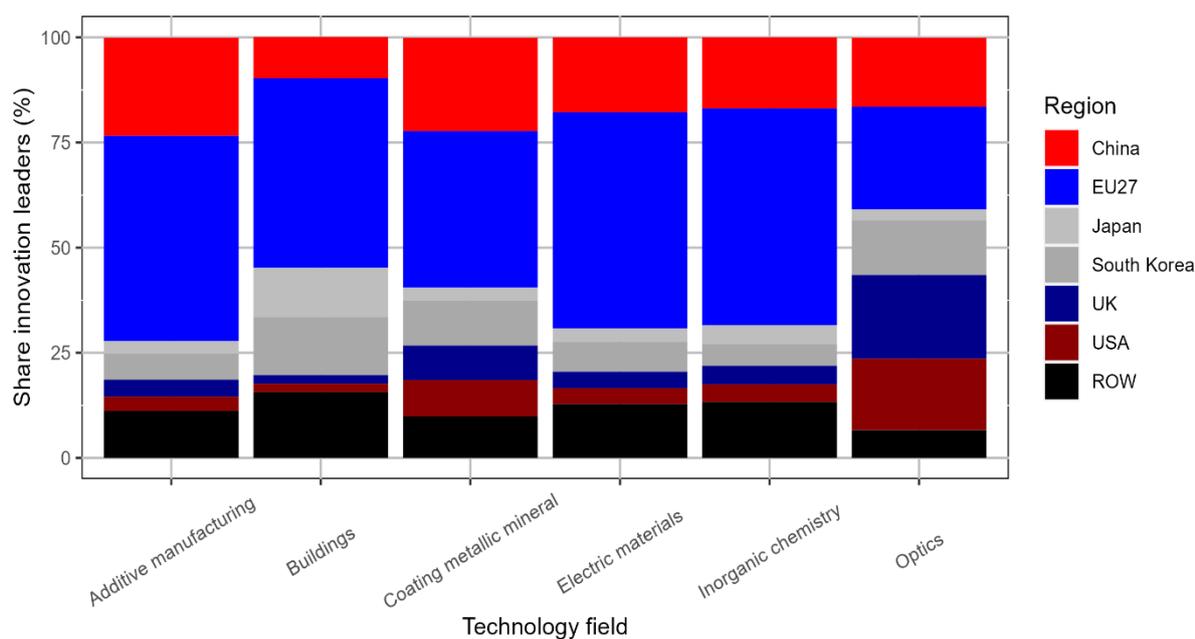


Source : Van de Velde et al. (2024) ; illustration personnelle.

¹⁸ Van de Velde, E., Braitto, N., Van Roy, V., Stanciauskas, V., Girdzijauskaitė, V., Cakic, M. (2024). Investissements industriels en R&D&I et analyse du marché des matériaux avancés. Summary report. Rapport d'expert indépendant pour la Commission européenne.

Outre la dimension économique, la capacité d'innovation est également un indicateur important de la position sur le marché. Van de Velde et al. (2024) ont utilisé des bases de données de brevets et de bibliométrie pour identifier ce que l'on appelle les leaders de l'innovation parmi les entreprises. Il s'agit d'entreprises qui ont montré un niveau élevé d'activité en matière de brevets au cours de la période la plus récente, en particulier dans le domaine des brevets sur les matériaux avancés de haute qualité. Au total, 17,6 % de toutes les entreprises de matériaux avancés actives au niveau mondial ont été identifiées comme chefs de file de l'innovation sur cette base. Le graphique 2 montre la répartition géographique des chefs de file de l'innovation en fonction des domaines technologiques (classes CPC). L'UE compte un plus grand nombre d'entreprises que les États-Unis et la Chine dans 18 des 19 domaines considérés. La part globale des entreprises de l'UE dans tous les domaines technologiques est de 42 %. Dans trois domaines technologiques, cette part est même supérieure à 50 % (matériaux électriques, chimie inorganique, transport et stockage). La taille des entreprises de l'UE ne reflète donc guère leur grande force d'innovation.

Graphique 2 : Part des entreprises leaders en matière d'innovation entre 2015 et 2020 par pays/région



Source : Van de Velde et al. (2024) ; illustration personnelle ; domaines technologiques sélectionnés ; ROW : Reste du monde.

Toutefois, des analyses récentes mettent également en évidence les dangers qui pèsent sur le maintien du leadership technologique dans le domaine des matériaux avancés à l'avenir. Il s'agit notamment des moins bonnes performances de l'UE dans d'importants domaines technologiques connexes. Le projet Advanced Technologies for Industry (ATI), lancé par la Commission européenne, constate dans ses évaluations des performances technologiques que l'UE est à la traîne par rapport à son principal concurrent mondial, les États-Unis, dans d'importants domaines d'application des matériaux avancés, en particulier dans les biotechnologies et les nanotechnologies industrielles¹⁹. Cela se traduit, par exemple, par une proportion plus faible de brevets de haute qualité et par des investissements moins

¹⁹ ATI (2021). Rapport final sur les tendances technologiques et l'adoption des technologies. Technologies avancées pour l'industrie.

importants dans de nouvelles capacités de production. À moyen terme, cette faiblesse relative peut également nuire au potentiel d'innovation dans le domaine des matériaux avancés, étant donné que les retombées de connaissances provenant de domaines connexes sont moins nombreuses.

En outre, la faiblesse générale de l'Europe dans la dynamique de la création d'entreprises s'applique également aux start-ups en rapport avec les matériaux avancés. Les start-ups de l'UE parmi les entreprises de matériaux avancés incluses dans l'ensemble de données de Van de Velde et al. (2024) ont levé un total de 9,1 milliards d'euros de capitaux au cours de la période 2012-2022. Cela ne représente que 6,3 % des capitaux levés dans le monde pour les jeunes entreprises de matériaux avancés. Environ deux tiers des capitaux investis au niveau mondial sont allés à des start-ups américaines. Les start-ups de l'UE ont reçu plus de capitaux que leurs concurrentes américaines dans un seul des 19 domaines technologiques examinés (la fabrication de papier). Même dans les domaines où l'UE est un leader particulièrement fort en matière d'innovation, tels que les matériaux électriques, la part de capital mesurée des start-ups de l'UE était inférieure à 10 %.

Cela démontre que l'examen des indicateurs de recherche tels que les dépenses de R&D et les demandes de brevets ne suffit pas à évaluer les potentiels de leadership technologique. Les obstacles systémiques à la commercialisation des nouveaux matériaux peuvent entraver le transfert de connaissances vers la conquête de nouveaux segments de marché et la production nationale. Dans le pire des cas, les fonds publics de recherche subventionnent la création d'emplois en dehors de l'UE si les start-ups sont délocalisées dans des régions où les conditions-cadres sont meilleures. Si les besoins des start-ups sont négligés, il existe également un risque d'augmentation de la concentration des activités de R&D entre les mains d'un petit nombre d'acteurs établis sur le marché. Cela affaiblit la concurrence intra-UE dans le domaine de la recherche sur les matériaux et menace d'inhiber davantage le potentiel d'innovation à long terme. La politique européenne devrait contrer ces dangers en adoptant une stratégie axée sur la chaîne de valeur qui identifie les goulets d'étranglement à tous les stades du processus d'innovation. Pour ce faire, il convient tout d'abord d'identifier les défis spécifiques liés à la génération, à l'échange et à l'utilisation des connaissances dans le domaine du développement des matériaux.

2.4 Défis spécifiques

L'importance particulière de l'innovation dans le domaine des matériaux en tant que base de la transformation économique est également associée à des défis caractéristiques. Dans de nombreux cas, cela est dû à la forte demande de diverses connaissances spécialisées. La combinaison d'éléments de connaissance complémentaires constitue la base de l'innovation matérielle. Elle nécessite un échange intensif d'informations entre des personnes issues de milieux académiques et souvent culturels différents. Pour que le transfert des connaissances individuelles réussisse dans ces circonstances, il faut d'abord les codifier sous une forme utilisable.

Comme le réservoir de connaissances nécessaire n'est généralement pas entièrement disponible au sein des institutions individuelles, il implique généralement un échange interinstitutionnel : entre les entreprises, les universités, les instituts de recherche et d'autres acteurs du paysage de la recherche. Outre une base contractuelle pour l'utilisation conjointe des connaissances générées, ce type d'échange nécessite toujours des facteurs non contraignants tels que la volonté de dialogue et la confiance entre les différents acteurs. Pour que cela se passe efficacement, l'échange de connaissances

doit être institutionnalisé. Il peut s'agir de formats organisationnels fixes tels que des comités de pilotage ou des équipes de recherche. L'interface peut également émerger des institutions elles-mêmes, par exemple des start-ups universitaires chargées de commercialiser les résultats de la recherche universitaire. Les relations individuelles peuvent également constituer une interface importante. La littérature sur l'économie de l'innovation, par exemple, souligne le rôle clé des scientifiques vedettes influents en tant que lien entre le monde universitaire et l'industrie et point de départ de l'activité entrepreneuriale²⁰.

D'un point de vue économique, l'innovation matérielle peut donc être considérée comme le résultat de réseaux de R&D complexes. Ceux-ci se caractérisent par de fortes économies d'échelle (taille du réseau) et d'envergure (diversité des acteurs). Le ciment qui maintient ces réseaux ensemble et leur permet de se développer est la connaissance générée et partagée conjointement.

Les difficultés de gestion de cet échange interinstitutionnel et interdisciplinaire de connaissances constituent un obstacle majeur à l'exploitation complète du potentiel d'innovation. Cela inclut la tendance générale à la complexité technologique. La diffusion interprofessionnelle des technologies numériques dans la production joue un rôle important. Elle nécessite une variété d'interfaces d'information pour les technologies de production analogiques établies. Cela crée une forte demande de matériaux innovants dotés de propriétés très spécifiques (par exemple, des matériaux pour les capteurs). La pression exercée pour passer à des méthodes de production respectueuses de l'environnement accélère également l'innovation dans les processus, ce qui modifie les exigences en matière de matériaux. Dans le domaine de la production d'hydrogène, par exemple, l'introduction de la technologie de l'électrolyse à haute température impose de nouvelles exigences en matière de résistance à la chaleur des matériaux²¹. Étant donné que bon nombre des technologies en question en sont encore à un stade de développement précoce, on peut s'attendre à l'avenir à une évolution rapide des exigences en matière de matériaux. Cela nécessite des processus de développement rapides et flexibles dans le domaine de la recherche sur les matériaux.

Les tendances en matière de durabilité à l'échelle de l'économie définissent également des restrictions de développement pour la conception des matériaux. Cela affecte l'efficacité du matériau dans la production ainsi que ses propriétés à long terme dans la phase d'utilisation des produits. Les exigences en matière de durabilité, de réparabilité et de recyclabilité des produits en aval augmentent et sont transmises aux matériaux sous-jacents en tant qu'exigences de conception. Des périodes d'essai plus longues sont nécessaires pour mieux évaluer les propriétés à long terme, y compris les données au niveau de l'utilisateur²².

Les flux d'informations étendus et diversifiés dans le développement des matériaux posent également un défi technique pour la gestion des données. Afin d'optimiser efficacement les propriétés des matériaux, des interfaces doivent être créées entre les différentes sources d'information du cycle de développement (données provenant de la modélisation des matériaux, des essais, du traitement, de

²⁰ Zucker, L. G. et Darby, M. R. (1996). Star scientists and institutional transformation : Patterns of invention and innovation in the formation of the biotechnology industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(23), 12709-12716.

²¹ Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J. et Few, S. (2017). Coût et performance futurs de l'électrolyse de l'eau : An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470-30492.

²² Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Grybauskas, A., Vilkas, M., & Petraitė, M. (2021). Industrie 4.0, innovation et développement durable : Une revue systématique et une feuille de route pour l'innovation durable. *Business Strategy and the Environment*, 30(8), 4237-4257.

l'utilisation et du recyclage). À cette fin, il convient de créer et d'héberger des référentiels de données centraux, qui seront utilisés conjointement par les parties prenantes au processus de développement. Cela nécessite des règles claires pour l'accès aux données et leur utilisation, ainsi que des normes d'interopérabilité communes pour garantir l'utilisabilité des ensembles de données externes²³.

Dans ce contexte, l'utilisation accrue de l'IA dans le développement des matériaux promet un grand potentiel, mais aussi des défis supplémentaires pour la gestion des données. En établissant des algorithmes de prise de décision, des programmes de développement entiers pourraient fonctionner de manière autonome à l'avenir. **La vision sous-jacente est celle d'un laboratoire autonome.** Sur la base des exigences en matière de matériaux, les algorithmes pourraient à l'avenir décider de manière autonome des simulations de modèles et des séries d'essais appropriées et utiliser les résultats pour décider des prochaines étapes de développement et des essais de suivi²⁴. De telles structures en boucle pourraient réduire considérablement le niveau nécessaire d'intervention humaine et libérer ainsi des ressources humaines supplémentaires pour des décisions plus stratégiques.

La condition préalable à la formation de ces algorithmes est l'accès à des ensembles de données importants et de haute qualité. Cela nécessite une harmonisation de la catégorisation et de la documentation des données. La structure des données provenant de différentes sources doit être normalisée autant que possible. La complexité et la diversité des informations qui circulent dans le processus représentent un obstacle particulier. Les silos de données existants doivent être démantelés et mis en réseau. Les parties prenantes qui étaient auparavant moins impliquées dans les processus de développement, telles que les producteurs en aval et les entreprises de recyclage, doivent également être activées en tant que sources de données.

L'une des principales implications politiques de cette forte pression de coordination est que le financement et la réglementation de l'État ne peuvent pas fonctionner comme une approche descendante. Ils doivent être intégrés dans un cadre de collaboration et d'échange mutuel de connaissances. La complexité et la nature éphémère des informations nécessaires à une réglementation sur mesure exigent que les décideurs politiques reçoivent des données en continu. C'est ainsi que se forment des réseaux d'innovation interinstitutionnels dotés de structures de gouvernance autonomes. Du point de vue réglementaire, le défi consiste à s'assurer que ces « satellites réglementaires » sont compatibles avec les objectifs généraux. Du point de vue de l'UE, il s'agit principalement de maintenir la concurrence sur les marchés intérieurs et de protéger les intérêts des petites et moyennes entreprises contre les conglomérats influents de la recherche industrielle et leurs monopoles de la connaissance.

3 Les matériaux avancés dans les politiques de l'UE

²³ Batra, R., Song, L. et Ramprasad, R. (2021). Emerging materials intelligence ecosystems propelled by machine learning (écosystèmes émergents d'intelligence matérielle propulsés par l'apprentissage automatique). *Nature Reviews Materials*, 6(8), 655-678.

²⁴ Abolhasani, M. et Kumacheva, E. (2023). The rise of self-driving labs in chemical and materials sciences (L'essor des laboratoires autonomes dans les sciences chimiques et des matériaux). *Nature Synthesis*, 2(6), 483-492.

3.1 Stratégies politiques globales

La présentation du « **Green Deal** » européen par la présidente de la Commission, Mme von der Leyen, le 11 décembre 2019, a marqué le début d'une nouvelle ère dans la politique climatique de l'UE²⁵. L'objectif ambitieux d'une économie européenne climatiquement neutre d'ici 2050 a été combiné à un programme de politique économique axé sur la croissance verte, y compris des mécanismes de transition juste pour les régions de l'UE menacées par le changement structurel. L'un des éléments clés de la mise en œuvre est le plan d'investissement européen pour le marché vert, qui comprend de nouveaux instruments de financement de l'UE pour la transformation verte (InvestEU, Mécanisme de transition juste). Un total de 1 000 milliards d'euros d'investissements durables doivent être mobilisés au cours de la période 2021-2030, financés par des sources privées et publiques²⁶. Le deuxième élément central est un grand nombre de nouvelles initiatives réglementaires visant à accélérer la réduction des émissions et d'autres objectifs sociétaux (circularité, pollution, biodiversité), dans tous les secteurs de l'économie de l'UE. Ces initiatives ont également défini de nouveaux paradigmes pour le développement des matériaux.

Tout d'abord, la mise à jour du **plan d'action pour l'économie circulaire** publiée le 11 mars 2020 a constitué une initiative majeure en matière de circularité des matériaux.²⁷ Ce plan a annoncé de nombreuses propositions législatives spécifiques à des produits et à des secteurs afin de renforcer les chaînes d'approvisionnement circulaires. Cela a conduit, entre autres, à une proposition de révision du règlement relatif aux emballages et aux déchets d'emballages²⁸, qui rehausse les ambitions en matière d'objectifs de recyclage et exige que les sacs de caisse en plastique très léger soient compostables, et contient une proposition de révision de la directive-cadre sur les déchets, qui fixe des objectifs supplémentaires de réduction des déchets dans les secteurs alimentaire et textile²⁹. Deuxièmement, la stratégie de l'UE pour les plastiques dans l'économie circulaire publiée le 16 janvier 2018 visait spécifiquement à réduire les déchets plastiques et à améliorer la rentabilité du recyclage des plastiques dans l'UE³⁰. Elle a jusqu'à présent donné lieu à une directive interdisant l'utilisation de certains types de plastiques à usage unique³¹ et à des règles limitant l'utilisation de microplastiques dans la production³².

²⁵ Commission européenne (2019). Le Green Deal européen. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2019) 640 final.

²⁶ Commission européenne (2020a). Plan d'investissement pour une Europe durable - Plan d'investissement européen pour le marché vert. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2020) 21 final.

²⁷ Commission européenne (2020b). Un nouveau plan d'action pour l'économie circulaire - Pour une Europe plus propre et plus compétitive. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2020) 98 final.

²⁸ Schwind, S., Reichert, G. (2023). [Emballages et déchets d'emballages](#). Analyse du cep No.3/2023.

²⁹ Commission européenne (2023b). Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets. COM(2023) 420 final.

³⁰ Commission européenne (2018). Une stratégie européenne pour les matières plastiques dans une économie circulaire. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2018) 28 final.

³¹ Union européenne (2019). Directive (UE) 2019/904 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'impact de certains produits en plastique sur l'environnement.

³² Union européenne (2023a). Règlement (UE) 2023/2055 de la Commission du 25 septembre 2023 modifiant l'annexe XVII du règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), en ce qui concerne les microparticules de polymère synthétique.

Le 10 mars 2020, la Commission a publié la communication « **Une nouvelle stratégie industrielle pour l'Europe** »³³. Elle a défini des domaines prioritaires pour les politiques industrielles afin de s'adapter aux objectifs du Green Deal et aux défis de la numérisation. L'une des priorités mentionnées est le renforcement de l'autonomie industrielle et stratégique de l'Europe par la réduction des dépendances externes en matière de biens essentiels. Cela inclut explicitement les matériaux critiques. Il s'agit de stimuler la compétitivité en développant des marchés européens propres pour ces matériaux grâce à une avance technologique. À cette fin, le document annonce un soutien accru au développement des matériaux avancés comme l'une des 12 technologies clés génériques (KET). La mise à jour 2021 de la stratégie industrielle a confirmé ce point de vue, en identifiant une autonomie accrue dans l'espace des matériaux comme l'un des éléments clés d'une reprise économique persistante après la crise du COVID³⁴.

En 2022, la Commission a résumé ses efforts de soutien à la recherche sur les matériaux dans un « **Plan stratégique de recherche et d'innovation pour des substances chimiques et des matériaux sûrs et durables** »³⁵. Ce plan identifie les domaines clés de la recherche et de l'innovation et tente ainsi de fournir des orientations aux futurs innovateurs. En outre, il examine comment améliorer les conditions-cadres de l'innovation dans le domaine des matériaux. L'une d'entre elles est l'accès à des données de qualité. Pour ce faire, la Commission cherche à améliorer le partage des données grâce à des plateformes ouvertes et à l'utilisation d'outils de big data. D'autres exigences concernent la validation des essais de matériaux et l'établissement de lignes directrices pour les essais, afin de faciliter l'utilisation des résultats des essais à des fins réglementaires. Un goulet d'étranglement spécifique identifié est la disponibilité de talents qualifiés dans la recherche. La Commission propose d'y remédier en adaptant les programmes universitaires à une approche plus interdisciplinaire et en intensifiant la collaboration entre le monde universitaire et l'industrie. En outre, elle estime qu'il faut davantage d'innovation pour parvenir à une mise en œuvre cohérente du principe « sûr et durable dès la conception » expliqué par la Commission dans une recommandation distincte³⁶ dans le domaine de la recherche sur les matériaux. Ce principe vise à minimiser l'utilisation de substances potentiellement nocives dans le développement des matériaux et à renforcer la prise en compte des effets sur l'environnement et la santé tout au long du cycle de vie.

3.2 Réglementation récente

En raison du large éventail de matériaux classés comme matériaux avancés, l'activité d'innovation dans ce domaine est confrontée à une myriade de règlements et de directives de l'UE. Dans le même temps, certains projets législatifs récents affectent la recherche sur les matériaux dans sa quasi-totalité. C'est le cas du **règlement sur l'écoconception des produits durables** proposé par la Commission le 30 mars

³³ Commission européenne (2020c). Une nouvelle stratégie industrielle pour l'Europe. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2020) 102 final.

³⁴ Commission européenne (2021). Actualisation de la nouvelle stratégie industrielle 2020 - Renforcer le marché unique pour relancer l'Europe. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social et au Comité des régions. COM(2021) 351 final.

³⁵ Commission européenne (2022a). Plan stratégique de recherche et d'innovation pour des substances chimiques et des matériaux sûrs et durables. Document de travail.

³⁶ Commission européenne (2022b). Recommandation de la Commission (UE) 2022/2510 du 8 décembre 2022 établissant un cadre européen d'évaluation des substances chimiques et des matériaux « sûrs et durables dès la conception ».

2022³⁷. Un accord provisoire en trilogue sur le règlement a été conclu le 5 décembre 2023³⁸. Son objectif est de garantir que la réduction des impacts environnementaux négatifs du cycle de vie devienne une partie intégrante du développement des produits, selon le principe de l'écoconception. Par rapport à la directive précédente, il élargit le champ d'application à davantage de groupes de produits et de catégories de durabilité. Son approche consiste à fournir un cadre harmonisé pour définir les exigences en matière de performance et d'information compatibles avec les objectifs de durabilité du Green Deal, tels que la durabilité, la réutilisation, la recyclabilité et l'amélioration de l'efficacité des matériaux et de l'énergie. Dans ce cadre, des exigences spécifiques pour certains groupes de produits seront définies ultérieurement par le biais d'actes délégués de la Commission. En outre, en tant que disposition générale, des passeports numériques obligatoires sont prévus pour les produits soumis au règlement lorsqu'ils sont mis sur les marchés de l'UE. Ces passeports doivent informer les consommateurs sur les caractéristiques de durabilité des produits et les aider à prendre des décisions de consommation éclairées en tenant compte de leurs préférences en matière de durabilité. Le règlement a donc le potentiel de modifier les conditions de concurrence sur les marchés des produits et des matériaux de manière perturbatrice, tant du point de vue de l'offre que de la demande.

Étant donné l'ambition de la recherche sur les matériaux de développer des substituts aux matières premières rares, la loi sur les matières premières critiques proposée par la Commission le 16 mars 2023 est également d'une grande importance³⁹. Un accord provisoire de trilogue sur le règlement a été conclu le 5 décembre 2023⁴⁰ et officiellement approuvé le 18 mars 2024⁴¹. La loi sur les matières premières critiques définit des objectifs ambitieux pour une liste de matières premières critiques afin de développer les capacités nationales dans le domaine de l'extraction, de la transformation et du recyclage des matières premières et de diversifier les importations de matières premières de l'UE. L'accent est mis sur la priorité à donner aux projets liés aux matières premières classées comme « stratégiques ». Les procédures d'approbation de ces projets doivent être raccourcies et un soutien particulier doit être apporté à l'accès aux sources de financement. Un résultat important des négociations du trilogue est que non seulement les projets visant à renforcer l'approvisionnement de ces matières premières seront considérés comme des candidats au statut de projet stratégique, mais aussi ceux qui pourraient conduire à la production de substituts appropriés. De cette manière, le développement des matériaux aura également accès au nouvel instrument de priorisation des projets.

En ce qui concerne l'importance des technologies de processus innovantes en tant que moteurs et facilitateurs de l'innovation matérielle, la **plateforme des technologies stratégiques pour l'Europe**

³⁷ Commission européenne (2022c). Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits durables et abrogeant la directive 2009/125/CE. COM(2022) 82 final.

³⁸ Conseil européen (2023a). [Des produits adaptés à la transition verte : Le 'écoconception.règlement relatif à l](#). Communiqué de presse.

³⁹ Commission européenne (2023c). Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) 168/2013, (UE) 2018/858, 2018/1724 et (UE) 2019/1020. COM(2023) 160 final.

⁴⁰ Conseil européen (2023b). [Le Conseil et le Parlement concluent un accord provisoire pour renforcer l'approvisionnement en matières premières critiques](#). Communiqué de presse.

⁴¹ Conseil européen (2024). [Autonomie stratégique : Le Conseil approuve définitivement la loi sur les matières premières critiques](#). Communiqué de presse.

(STEP) établie par le règlement (UE) 2024/795 peut fournir un élan supplémentaire à l'avenir⁴². La tâche de la STEP est de canaliser les canaux de financement existants de l'UE pour le soutien à l'investissement vers trois domaines d'investissement cibles : les technologies numériques et l'innovation technologique approfondie, les technologies propres et efficaces en termes de ressources, les biotechnologies. Ces catégories de technologies sont classées comme critiques. Ces trois domaines ont des besoins divers en matériaux avancés pour leur utilisation (voir sous-section 2.1). En outre, la STEP introduit un sceau de souveraineté, un nouveau label qui sera attribué aux projets de haute qualité qu'elle finance. Les premiers appels à financement de projets devraient être publiés au deuxième trimestre 2024⁴³. S'il est possible d'accroître le déploiement de ce groupe de technologies critiques dans l'UE en rationalisant le financement public, cela aura également un effet d'attraction sur le développement des matériaux et libérera des fonds privés et publics supplémentaires pour ce segment de la R&D.

3.3 Communication sur les matériaux avancés

Avec sa communication sur les « matériaux avancés pour une avance industrielle » publiée le 17 février 2023, la Commission cherche à sensibiliser le grand public sur l'importance stratégique des matériaux avancés en tant que domaine technologique et définit un catalogue de mesures pour la progression technologique de l'Europe⁴⁴. Sa perspective sur les processus de développement des matériaux est celle d'un écosystème de parties prenantes coopératives. Selon le concept de la Commission, cet écosystème devrait être « dynamique », « sûr » et « inclusif ».

La caractéristique « dynamique » reflète l'idée de destruction créatrice qui caractérise les marchés des matériaux industriels. Le développement de matériaux spécialisés innovants permet d'espérer des rentes de monopole, mais celles-ci ne sont souvent que temporaires. La position sur le marché est menacée, d'une part, par la mise au point de meilleurs matériaux par les concurrents et, d'autre part, par l'évolution des technologies et des marchés du côté des applications, qui peut rendre les matériaux obsolètes. Pour garantir la compétitivité, il faut donc investir en permanence dans le développement de produits. Le terme « sûr » fait référence à l'importance des matériaux avancés pour la sécurité économique générale de l'UE, à la fois en termes de nécessité de garantir l'accès aux matériaux spéciaux pour les entreprises européennes et de contribution des matériaux auto-développés à la maîtrise des risques liés à l'approvisionnement extérieur (voir sous-section 2.2). Dans un sens plus large, cela indique également l'importance des matériaux avancés pour la production de biens militaires de haute technologie. La caractéristique « inclusive » fait référence à la grande importance de la coopération en matière de recherche et de l'échange de connaissances pour la capacité d'innovation de l'UE dans ce domaine.

Pour concrétiser cette vision, la Commission propose des mesures structurées en cinq piliers. Le premier pilier vise à **renforcer la recherche et l'innovation européennes sur les matériaux avancés**. La Commission demande qu'une approche stratégique commune de la recherche sur les matériaux avancés soit élaborée en collaboration avec les États membres, les pays associés et les parties

⁴² Union européenne (2024). Règlement (UE) 2024/795 établissant la plateforme technologique stratégique pour l'Europe (STEP) et modifiant la directive 2003/87/CE et les règlements (UE) 2021/1058, (UE) 2021/1056, (UE) 2021/1057, (UE) n° 1303/2013, (UE) n° 223/2014, (UE) 2021/1060, (UE) 2021/523, (UE) 2021/695, (UE) 2021/697 et (UE) 2021/241.

⁴³ Commission européenne (2024b). [Plateforme de technologies stratégiques pour l'Europe](#).

⁴⁴ Voir Commission européenne (2024a).

prenantes de l'industrie et des organismes de recherche. Cette approche devrait commencer par la définition d'un ensemble commun d'objectifs et de domaines thématiques prioritaires. Une première sélection de domaines stratégiques a déjà été effectuée concernant l'énergie, la mobilité, la construction et l'électronique. Dans ces domaines, il est envisagé d'axer la recherche sur les matériaux destinés à des groupes de produits spécifiques, en mettant l'accent sur les matériaux qui améliorent les performances et/ou la durabilité (par exemple, l'efficacité énergétique, la circularité) des produits essentiels à la transformation verte et à la numérisation. L'approche stratégique commune est censée être élaborée d'ici à la fin de 2024 et, à partir de là, régulièrement mise à jour, en tenant compte de l'évolution sociale et technologique. En outre, la Commission entreprendra une analyse de substitution pour les matières premières critiques, en identifiant les besoins en matière de recherche et d'investissement dans le développement de matériaux avancés nationaux en tant que substituts. Ceci met à nouveau en évidence le rôle fonctionnel des matériaux avancés pour le Green Deal et la stratégie industrielle de l'UE. La spécialisation stratégique dans le domaine des matériaux doit se faire dans le respect de la transformation technologique de la base industrielle, en contribuant à ses objectifs et en limitant ses effets secondaires indésirables (pression accrue sur les coûts, nouvelles dépendances à l'égard des ressources extérieures).

Le deuxième pilier (« du laboratoire à l'usine ») vise à améliorer le **transfert du développement des matériaux vers la production industrielle**. Il s'agit d'un élément de la tentative de réduire l'écart entre le succès de la recherche et la commercialisation. Le principal instrument pour y parvenir est la création d'un espace commun de données numériques, appelé « *material commons* ». Il est prévu de créer un environnement contrôlé pour les innovateurs dans le domaine des sciences des matériaux. En améliorant l'accès rapide et simple aux données de modélisation et d'expérimentation, il est censé accélérer le processus de développement et d'essai de nouveaux matériaux. Cela impliquera l'utilisation ciblée de l'IA pour proposer des solutions sur mesure aux problèmes de matériaux (par exemple, en transformant des données provenant de sources hétérogènes en nouvelles hypothèses testables pour l'avancement des matériaux)⁴⁵. Le type de données échangées ne se limite pas aux propriétés pertinentes des matériaux, mais comprend également des informations sur les pratiques méthodologiques, afin de garantir la reproductibilité des essais sur les matériaux. Pour garantir l'utilisation responsable de ces données sensibles et éviter les distorsions de concurrence involontaires, une structure de gouvernance rigoureuse est nécessaire. La Commission propose les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable) comme lignes directrices pour la gouvernance. Ces principes exigent que l'espace de données soit accessible dans tous les secteurs, qu'il soit interopérable avec d'autres plateformes de données et qu'il fournisse des données dans un format normalisé permettant leur réutilisation par d'autres participants. La réglementation européenne existante, en particulier les règles de partage et d'utilisation des données définies par la loi sur la gouvernance des données⁴⁶ et la loi sur les données⁴⁷, fournit le cadre nécessaire à cet effet.

Cette infrastructure numérique est censée être complétée par une infrastructure d'essai physique commune. Pour ce faire, le concept des bancs d'essai d'innovation ouverte (OITB) est essentiel. Il s'agit

⁴⁵ Voir AMI (2022).

⁴⁶ Union européenne (2022). Règlement (UE) 2022/868 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2022 relatif à la gouvernance européenne des données et modifiant le règlement (UE) 2018/1724 (loi sur la gouvernance des données).

⁴⁷ Union européenne (2023b). Règlement (UE) 2023/2854 du Parlement européen et du Conseil du 13 décembre 2023 concernant des règles harmonisées relatives à l'accès équitable aux données et à leur utilisation, et modifiant le règlement (UE) 2017/2394 et la directive (UE) 2020/1828 (loi sur les données).

de groupes de laboratoires, d'installations d'essai et de fournisseurs de services d'innovation qui coopèrent sur la base d'un point d'entrée unique. Ils sont conçus pour offrir une solution tout-en-un accessible pour tester des matériaux nouvellement inventés et les développer pour en faire des produits industriels. Techniquement, l'objectif est de passer de la validation en laboratoire (niveau de maturité technologique (TRL) 4) aux prototypes industriels (TRL 7). Ils doivent être ouverts à des prix équitables à toute institution, y compris les organisations publiques et privées, l'industrie et la recherche. Des accords transparents sur l'échange de données et le traitement de la propriété intellectuelle sont des conditions préalables importantes. Outre la fourniture de services d'infrastructure, les OITB façonnent aussi activement le paysage de la recherche par le biais de leurs propres appels à propositions de projets correspondant au domaine thématique des OITB⁴⁸.

D'un point de vue macroéconomique, les OITB bien gérées fournissent donc au moins trois types de services qui augmentent le bien-être. Premièrement, elles permettent l'exploitation d'économies d'échelle à l'échelle de l'industrie dans l'utilisation conjointe de l'infrastructure d'essai. Deuxièmement, elles réduisent les coûts de transaction en mettant en relation les innovateurs et les demandeurs industriels dans le processus d'innovation des matériaux avancés. Étant donné que cet appariement réduit spécifiquement les obstacles à l'information pour les petites et moyennes entreprises, il peut également avoir des effets favorables à la concurrence. Troisièmement, les travaux des OITB signalent les priorités actuelles en matière de recherche et contribuent ainsi à orienter les efforts de R&D de l'industrie et du secteur public vers des domaines dont les perspectives économiques sont favorables et qui revêtent une importance stratégique générale. Actuellement, des OITB à l'échelle de l'UE sont déjà actives dans des domaines tels que la construction et les produits pharmaceutiques, en partie grâce au financement de projets Horizon⁴⁹. Sur la base de l'expérience acquise, la Commission annonce le lancement d'un catalogue à entrée unique. Il fournira des orientations sur les services et l'accès aux infrastructures technologiques telles que les OITB, afin de remédier aux disparités régionales observées en matière d'accès aux infrastructures⁵⁰.

Le troisième pilier résume les mesures visant à **augmenter l'ensemble des investissements en capital dans le développement et le déploiement des matériaux avancés**, s'attaquant ainsi au goulet d'étranglement du financement (voir sous-section 2.3). Pour débloquer les capitaux privés, la Commission cherche à utiliser une combinaison de canaux de financement publics existants et nouveaux. Tout d'abord, au niveau de l'UE, elle fait référence au nouveau partenariat public-privé (PPP) « Matériaux innovants pour l'UE » annoncé dans le cadre d'Horizon Europe. Il cofinancera des projets d'innovation dans le domaine des matériaux pour un montant total de 500 millions d'euros au cours de la période 2025-27, la moitié de la contribution étant apportée par les entreprises privées participantes. En outre, il s'appuie sur les espoirs suscités par la nouvelle plateforme de technologies stratégiques pour l'Europe (STEP)⁵¹. Il est prévu de canaliser les sources de financement existantes, telles que InvestEU ou les fonds de la politique de cohésion, vers le financement du développement et de la fabrication de technologies critiques au niveau national. Celles-ci impliquent également diverses

⁴⁸ Commission européenne/Agence exécutive européenne pour la santé et le numérique (2023). Bancs d'essai d'innovation ouverte - Améliorer l'accès à la connaissance pour accélérer l'innovation européenne. Office des publications de l'Union européenne, 2023.

⁴⁹ Commission européenne (2023d). Bancs d'essai d'innovation ouverte pour les matériaux avancés. Office des publications de l'Union européenne, 2023.

⁵⁰ Commission européenne (2019). Infrastructures technologiques. Document de travail des services de la Commission.

⁵¹ Voir Union européenne (2024).

formes de matériaux avancés (voir sous-section 2.1). D'autres canaux de financement de l'UE, axés dans une certaine mesure sur les applications des matériaux, sont mentionnés : le Fonds pour l'innovation qui soutient la décarbonisation de l'industrie européenne (c'est-à-dire la fabrication de matériaux avancés pour réduire l'empreinte carbone) et les fonds de l'initiative « Global Gateway » (coopération avec les pays tiers pour le déploiement de matériaux avancés)⁵². En outre, la Commission annonce qu'elle étudiera la possibilité de renforcer la coopération entre les États membres par le biais d'un nouveau projet important d'intérêt commun pour l'Europe (IPCEI)⁵³ pour le premier déploiement industriel de matériaux avancés innovants.

Le quatrième pilier vise à **encourager la production et l'utilisation de matériaux avancés**. Il s'agit donc de soutenir la phase de post-développement, en particulier la mise à l'échelle des solutions innovantes et l'établissement de positions stables sur le marché. Pour améliorer les performances de l'UE à cet égard, la Commission propose de se concentrer sur trois instruments essentiels : les normes, l'amélioration des compétences et les marchés publics. Les normes industrielles sont des normes techniques utilisées par les parties prenantes d'une industrie sur la base d'accords volontaires. Elles peuvent concerner des domaines tels que la conception de produits et de processus et l'application de procédures de mesure et d'essai⁵⁴. En général, les pratiques de normalisation comportent plusieurs avantages économiques, tels que des économies de coûts grâce à une adoption facilitée de la technologie par les entreprises, une sécurité garantie et une interopérabilité améliorée des appareils pour les consommateurs, ainsi que le soutien du commerce international et de l'ouverture des marchés⁵⁵. Dans sa communication, la Commission insiste particulièrement sur le rôle des normes d'interopérabilité et des méthodes d'essai harmonisées comme moyen de réduire les frictions et d'améliorer le flux d'informations externes. Pour promouvoir les activités de normalisation, la Commission a déjà publié une recommandation demandant aux établissements d'enseignement et aux organismes de recherche d'élaborer une politique de normalisation spécifique, comprenant une coopération accrue avec les organismes de normalisation, des activités de formation interne et un suivi des activités de normalisation sur la base d'indicateurs⁵⁶. En outre, elle annonce une coopération accrue avec les organismes internationaux de normalisation afin d'identifier les lacunes existantes dans les normes industrielles relatives aux matériaux avancés.

Pour aborder la question de la pénurie de compétences en tant que goulot d'étranglement dans l'innovation matérielle, la Commission se réfère à son pacte pour les compétences⁵⁷. Il s'agit d'un réseau d'organisations privées et publiques visant à améliorer la qualification et la requalification des adultes européens, en mettant l'accent sur les personnes issues de groupes défavorisés. En outre, elle annonce un appel à la création d'une plateforme sur les matériaux avancés. Son objectif est de développer des programmes d'études et de formation adaptés, axés sur les sciences des matériaux. En ce sens, elle s'apparente au rôle des travaux académiques sur la neutralité carbone lancés dans le cadre du règlement européen pour une industrie neutre en carbone (*Net Zero Industry Act NZIA*) pour

⁵² Wolf, A., Poli, E. (2024). Une passerelle mondiale pour des chaînes d'approvisionnement sûres ? [Étude du cep No. 3/2024](#).

⁵³ Commission européenne (2024c). [Projets importants d'intérêt européen commun \(IPCEI\)](#).

⁵⁴ ISO (2024). [Normes](#). Organisation internationale de normalisation.

⁵⁵ Swann, G. P. (2010). Normes internationales et commerce : Une revue de la littérature empirique. Documents de politique commerciale de l'OCDE, (97).

⁵⁶ Commission européenne (2023e). Recommandation (UE) 2023/498 de la Commission du 1er mars 2023 relative à un code de bonne pratique sur la normalisation dans l'Espace européen de la recherche.

⁵⁷ Commission européenne (2024). [Pacte pour les compétences](#).

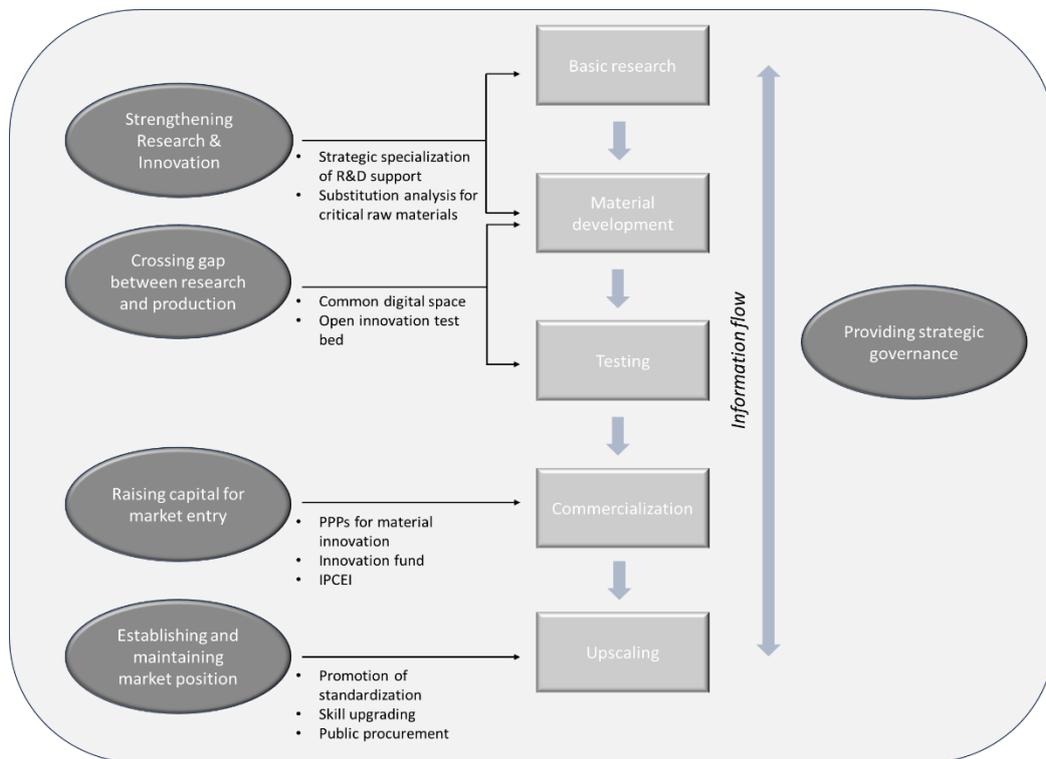
enseigner les compétences nécessaires aux technologies stratégiques de la décarbonation. En tant que mesure axée sur la demande visant à promouvoir la fabrication nationale, la communication envisage un rôle stratégique pour les marchés publics. Elle fait référence aux critères d'attribution élargis pour les appels d'offres publics, en mentionnant les exigences d'efficacité énergétique fixées par la directive sur les énergies renouvelables à titre d'exemple⁵⁸. Ces critères pourraient avoir un effet discriminant positif sur la demande des matériaux les plus innovants, dans la mesure où ces matériaux présentent des propriétés supérieures dans les domaines concernés. En outre, les nouveaux critères de durabilité et de résilience définis par la NZIA pour les marchés publics liés aux technologies neutres en carbone pourraient également être mentionnés, car ils favorisent les solutions durables nationales dans le domaine des matériaux⁵⁹. La Commission annonce qu'elle complétera ces incitations existantes par une initiative ciblée « Big Buyer », visant à obtenir un pouvoir de marché stratégique en regroupant les acheteurs publics et en orientant leur demande vers des solutions innovantes et durables en matière de matériaux.

Enfin, le cinquième pilier consiste en **la mise en place d'une structure de gouvernance**. Elle sert à coordonner et à contrôler la mise en œuvre des mesures uniques annoncées dans la communication. Cela impliquera la création d'un Conseil technologique pour les matériaux avancés, dont les membres seront des représentants de la Commission, des États membres de l'UE ainsi que des acteurs de la recherche et de l'industrie. Outre la coordination et le suivi, sa tâche consiste également à établir des contacts avec les foyers d'innovation régionaux existants et avec les pays tiers, afin de créer des synergies et d'élaborer des stratégies d'innovation communes. Ses fonctions sont donc très similaires à celles d'autres conseils de coordination récemment approuvés dans le cadre de la réglementation de l'UE, comme le NZIA et la loi sur les matières premières critiques⁶⁰.

⁵⁸ Union européenne (2023c). Directive (UE) 2023/2413 du Parlement européen et du Conseil du 18 octobre 2023 modifiant la directive (UE) 2018/2001, le règlement (UE) 2018/1999 et la directive 98/70/CE en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et abrogeant la directive (UE) 2015/652 du Conseil.

⁵⁹ Commission européenne (2023f). Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre de mesures destiné à renforcer l'écosystème européen de fabrication de produits à technologie nette zéro (Net Zero Industry Act) (COM(2023) 161 final).

⁶⁰ Voir Commission européenne (2023c).

Graphique 3 : Structure de la stratégie de l'UE en matière de matériaux avancés

Source : illustration personnelle

En résumé, **la structure globale des cinq piliers suit de près la logique de la chaîne de valeur de l'innovation**. Elle commence par des mesures visant à promouvoir la recherche et le développement, se poursuit par des outils destinés à transférer les connaissances nouvellement créées à l'industrie et à fournir la base de capital nécessaire, et se termine par des instruments destinés à faciliter l'entrée sur le marché et la montée en gamme des nouvelles solutions matérielles. Dans le même temps, le concept envisage une combinaison de différents types d'instruments de soutien (financiers, institutionnels (coordination), stratégiques) appliqués de manière transversale à toutes les étapes de la chaîne de valeur. Le graphique 3 ci-dessus illustre cette structure.

4 Dynamique et moteurs de l'innovation : le cas des nanomatériaux

4.1 Définition et champs d'application

Le domaine des nanotechnologies englobe le développement et l'application de structures qui impliquent l'utilisation de nanomatériaux. Les nanomatériaux sont des matériaux dont les unités individuelles (particules) ne dépassent pas une taille de 100 nanomètres (échelle nanométrique) dans au moins une de leurs trois dimensions spatiales⁶¹. Si les particules sont à l'échelle nanométrique dans les trois dimensions, on parle de nanoparticules. Les nanomatériaux existent à la fois dans la nature et sous forme synthétisée. La production synthétique peut être ascendante ou descendante. Dans les processus ascendants, les nanomatériaux sont obtenus par manipulation chimique à un niveau encore

⁶¹ Commission européenne (2022d). Recommandation de la Commission du 10 juin 2022 sur la définition des nanomatériaux (2022/C 229/01).

plus petit (atomes simples, molécules). Dans les processus descendants tels que le broyage mécanique et l'électrofilage, les matériaux en vrac sont décomposés en nanostructures⁶².

Une propriété commune à tous les nanomatériaux est un rapport surface/volume élevé. L'avantage des nanomatériaux réside dans leurs propriétés mécaniques et chimiques très différentes de celles des matériaux en vrac. La magnétisation et la conductivité électrique des éléments et des composés peuvent être plus élevées dans les nanostructures que dans les matériaux à macro-échelle. Les propriétés exactes peuvent varier considérablement en fonction de la taille et de la forme des particules. Cela permet un haut degré d'ajustement des propriétés souhaitées et donc un fort potentiel pour des solutions matérielles sur mesure. Récemment, des propriétés particulièrement prometteuses ont été attribuées aux nanocomposites. Ils se composent de plusieurs matériaux dans différentes phases, dont au moins un est présent à l'échelle nanométrique⁶³.

L'éventail des applications des nanomatériaux est aussi varié que leur composition. Un domaine généralement important est l'utilisation de matériaux nanométriques comme additifs pour améliorer les propriétés des produits. Il s'agit, par exemple, d'additifs destinés à accroître l'efficacité des catalyseurs dans les processus chimiques, à améliorer les propriétés des matériaux à base de polymères (par exemple, plus durables, moins lourds) dans des secteurs tels que l'industrie automobile et à accroître l'efficacité des produits cosmétiques. Les propriétés fonctionnelles des composés biochimiques tels que les enzymes peuvent également être modifiées en les combinant avec des nanoparticules, ce qui permet de créer de nouvelles méthodes de production pour les produits et les carburants d'origine biologique. Le secteur médical offre également des applications potentielles prometteuses pour l'avenir. Par exemple, les nanoparticules peuvent être utilisées comme vecteurs de médicaments, notamment pour mieux atteindre directement les cellules malades dans le cadre d'une chimiothérapie ou pour remplacer l'utilisation d'aiguilles dans l'administration de vaccins. Les nanotechnologies peuvent également être utilisées pour développer des outils de diagnostic plus efficaces. Un autre domaine d'application important est l'industrie électronique. À l'avenir, les nanoparticules pourraient également être de plus en plus utilisées pour réparer les dommages causés à l'environnement, par exemple pour purifier les eaux souterraines de la pollution industrielle. Les nanomatériaux et les technologies qui leur sont associées peuvent donc contribuer aux objectifs du Green Deal de l'UE de diverses manières⁶⁴.

4.2 Tendances en matière de brevets nanotechnologiques

Toute tentative de comparaison du succès de l'innovation dans le domaine des nanomatériaux se heurte à des difficultés de mesure. Cela est dû en partie à l'ambiguïté du terme « innovation ». Au sens général du terme, l'innovation peut désigner une nouvelle idée, sa concrétisation sous la forme d'une conception ou d'un produit, ou le processus de développement de nouvelles idées, de nouvelles conceptions ou de nouveaux produits. Dans le contexte économique, l'innovation est généralement comprise comme le lancement sur le marché de nouveaux produits ou processus qui diffèrent des produits ou processus existants par des caractéristiques pertinentes. Elle s'appuie donc sur des travaux

⁶² Roduner, E. (2006). Size matters : why nanomaterials are different (La taille compte : pourquoi les nanomatériaux sont différents). *Chemical society reviews*, 35(7), 583-592.

⁶³ Baig, N., Kammakakam, I. et Falath, W. (2021). Nanomatériaux : Une revue des méthodes de synthèse, des propriétés, des progrès récents et des défis. *Materials Advances*, 2(6), 1821-1871.

⁶⁴ NNI (2024). [Applications des nanotechnologies](#). Initiative nationale américaine sur les nanotechnologies.

de recherche et de développement préalables. Globalement, l'innovation est donc mieux décrite comme un processus de découverte cumulative en plusieurs étapes : les chercheurs découvrent de nouveaux mécanismes par le biais de la recherche fondamentale, qui sont repris par le développement de produits, testés, pilotés et enfin commercialisés sur les marchés. Le succès de l'innovation dépend donc de toute une série d'acteurs dont les intérêts ne sont pas toujours homogènes. Les niveaux de préparation technologique (Technology Readiness Levels - TRL) sont un moyen courant de caractériser les étapes des processus d'innovation. L'échelle officielle des TRL a été développée par la NASA et adoptée par l'UE pour le programme-cadre Horizon 2020. Elle comprend neuf niveaux, du développement du concept à la préparation commerciale⁶⁵.

D'un point de vue économique, il est logique de commencer à mesurer l'innovation au moment où la perspective de commercialisation des inventions devient évidente grâce à l'enregistrement des droits de propriété. Les données sur les brevets sont donc souvent à la base des indicateurs d'innovation basés sur les résultats. Leurs limites sont bien connues⁶⁶. Elles ne fournissent pas d'informations sur le succès commercial ultérieur des inventions brevetées et sur leur impact sociétal général. Elles ne constituent pas non plus une mesure parfaite de l'innovation au stade du développement, car de nombreux types d'inventions ne sont pas brevetables pour des raisons techniques ou juridiques. Néanmoins, les principaux avantages sont le degré élevé d'harmonisation internationale et le haut niveau de détail technologique des statistiques sur les brevets. Le système de classification internationale des brevets (CIB) permet une subdivision extrêmement fine en fonction des domaines technologiques⁶⁷. En outre, des informations sur les réseaux d'innovation via les références croisées (citations) et la coopération suprarégionale entre les institutions et les inventeurs sont disponibles.

Pour la comparaison internationale des activités d'innovation dans le domaine des nanotechnologies, nous utilisons les données de PATSTAT, la base de données statistique mondiale sur les brevets de l'Office européen des brevets (OEB)⁶⁸. Il s'agit de l'une des bases de données de brevets les plus complètes au monde et d'un choix populaire pour les analyses d'innovation. Pour la définition des nanotechnologies, nous appliquons la sous-classe correspondante « Nanotechnologie » (B82) de la classification IPC. Elle comprend tous les types d'innovation associés aux nanotechnologies. Outre le développement de nouvelles nanostructures, elle comprend des technologies spécifiques pour la production, le traitement de l'information et la mesure. Pour cette classe, des données sur tous les brevets enregistrés au cours de la période 2000-2022 ont été récupérées par le biais de requêtes de recherche dans PATSTAT. Les données collectées pour chaque brevet comprennent l'affiliation à une classe technologique spécifique, l'appartenance à une famille de brevets et le(s) type(s) d'institution(s) du (des) demandeur(s) (voir ci-dessous). L'ensemble de données généré contient un total de 861 918 observations. Dans l'étape suivante, il a été fusionné avec les données de la base REGPAT de l'OCDE⁶⁹. Celle-ci contient des informations supplémentaires sur les noms et les adresses résidentielles des inventeurs enregistrés dans les brevets, ce qui permet une répartition spatiale détaillée. Par rapport à l'utilisation des adresses des demandeurs, qui, dans le cas des entreprises multinationales, peuvent

⁶⁵ NASA (2024). [Niveaux de préparation technologique](#). L'administration nationale de l'aéronautique et de l'espace.

⁶⁶ Wydra, S. (2020). Mesurer l'innovation dans la bioéconomie - Discussion conceptuelle et expériences empiriques. *Technology in Society*, 61, 101242.

⁶⁷ OMPI (2024) : [Classification internationale des brevets \(CIB\)](#). Organisation mondiale de la propriété intellectuelle.

⁶⁸ OEB (2024). [PATSTAT - Ensemble de données de base pour l'analyse statistique](#). Office européen des brevets.

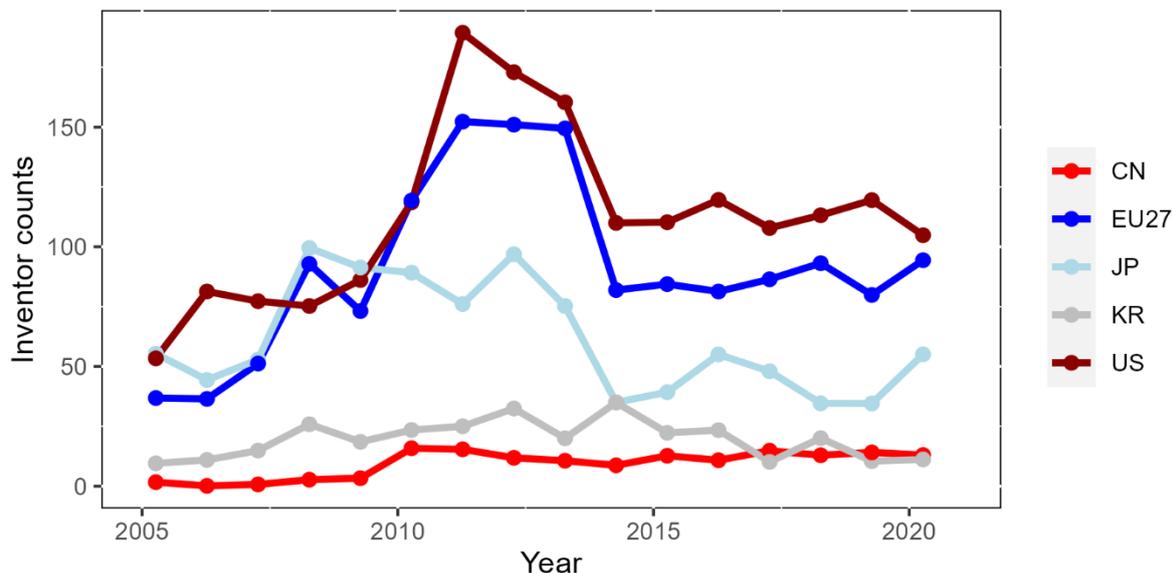
⁶⁹ OCDE (2024). Statistiques et analyse de la propriété intellectuelle (PI). Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

être une société mère ou une filiale située loin des activités de R&D, cette méthode permet d'obtenir une image spatiale plus précise de l'innovation.

Le nombre de demandes de brevet est un indicateur courant pour quantifier l'activité en matière de brevets. Pour une comparaison par pays, nous devons tenir compte du fait que plusieurs personnes sont souvent enregistrées en tant qu'inventeurs d'un brevet et qu'elles peuvent se trouver dans différents pays. Comme c'est souvent le cas dans la littérature, nous en tenons compte en appliquant une part égale pour chaque inventeur en tant que facteur de pondération. Par exemple, dans le cas d'un brevet avec huit inventeurs enregistrés, chaque inventeur se voit attribuer une part de 0,125. Ensuite, nous calculons l'activité totale d'innovation en nanotechnologie d'un pays comme la somme des parts des inventeurs résidant dans le pays concerné (« nombre d'inventeurs »).

Le graphique 4 montre d'abord l'évolution du nombre d'inventeurs pour l'ensemble de l'UE des 27 par rapport aux pays tiers les plus actifs. Elle reflète les rôles dominants des États-Unis et de l'UE en tant que moteurs mondiaux de l'innovation dans le domaine des nanotechnologies. Ces dernières années, les deux champions de l'innovation ont pu prendre une nette avance sur le Japon, qui était l'un des plus grands innovateurs au monde au début des années 2000. Toutefois, le rythme de l'innovation s'est ralenti pour presque toutes les grandes forces en présence au cours de la dernière décennie. La Chine est une exception, bien que son niveau d'innovation soit encore bien inférieur à celui des États-Unis et de l'UE.

Graphique 4 : Évolution des activités de brevetage des nanotechnologies dans les principaux pays inventeurs dans le monde

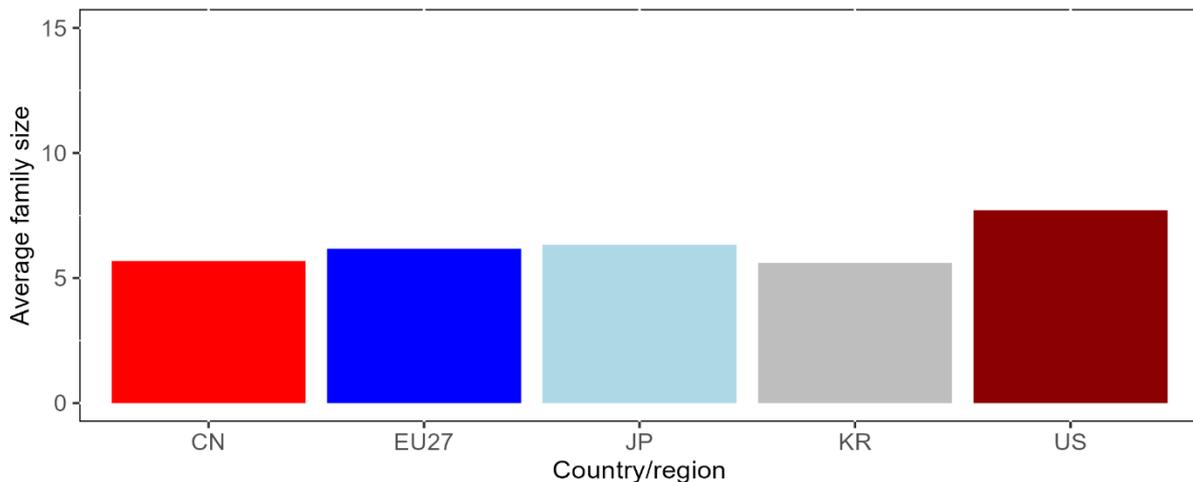


Sources : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels.

L'examen de la qualité des demandes de brevet offre une perspective complémentaire importante. Diverses mesures permettant d'enregistrer la qualité des brevets sont examinées dans la littérature. L'indicateur de la taille de la famille de brevets contenu dans PATSTAT permet de mesurer la qualité sur la base du degré de diffusion. Toutes les demandes de brevet dont le contenu technique est identique ou très similaire sont regroupées pour former une famille de brevets. Une telle famille peut apparaître, par exemple, lorsqu'une demande initiale est étendue à d'autres pays (et offices de

brevets). La taille de la famille est donc une approximation du potentiel de marché mondial escompté pour les innovations. Ci-dessous, nous utilisons la taille moyenne de la famille de tous les brevets nanotechnologiques impliquant des investisseurs nationaux comme indicateur de la qualité des brevets nationaux. Le graphique 5 illustre la taille moyenne des familles sur la période 2005-2020. À cet égard, les États-Unis ont nettement surpassé l'UE et les principaux concurrents d'Asie de l'Est. L'UE se classe au-dessus de la Chine et de la Corée du Sud et près du niveau du Japon.

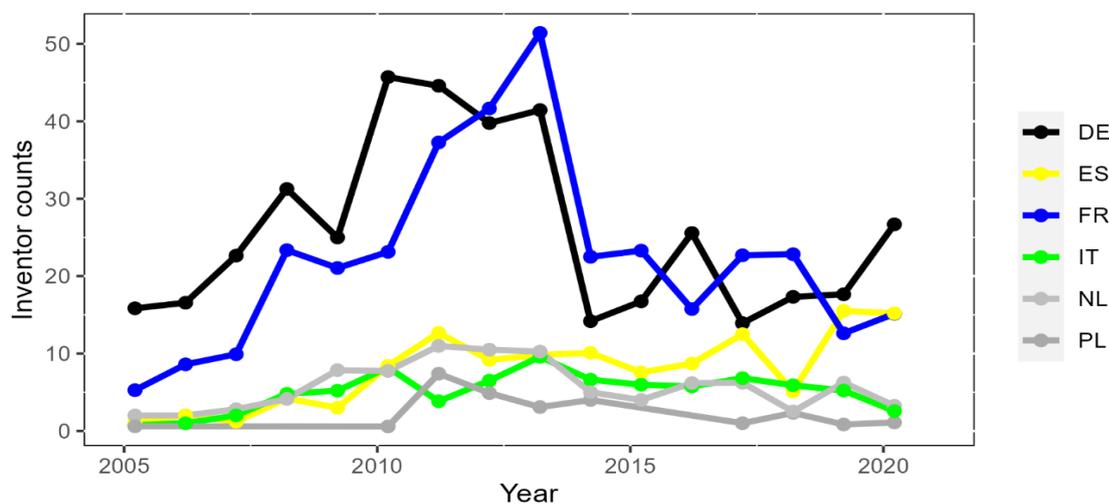
Graphique 5 : Taille moyenne des familles de brevets nanotechnologiques par pays 2005-2020



Sources : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels.

Si l'on compare les plus grandes économies de l'UE, l'Allemagne et la France ont affiché le plus haut niveau d'activité en matière de brevets ces dernières années en termes absolus (voir graphique 6). Toutefois, le déclin de l'activité d'innovation au cours de la dernière décennie a été particulièrement prononcé dans ces deux pays. En 2020, l'Espagne pourrait rattraper la France. Par habitant, l'activité d'innovation de la France a été régulièrement supérieure à celle de l'Allemagne. L'Italie et la Pologne ont toujours affiché un nombre d'inventeurs par habitant comparativement faible.

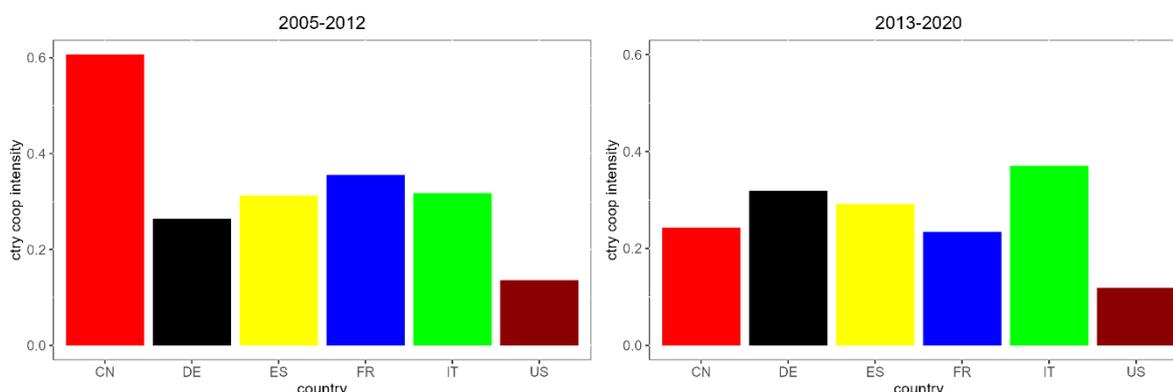
Graphique 6 : Évolution des activités de brevetage en nanotechnologie dans certains États membres



Sources : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels.

En outre, notre ensemble de données nous permet de faire des comparaisons par pays sur l'étendue de la coopération internationale dans les activités d'innovation en comparant les adresses des inventeurs enregistrées dans les demandes de brevet. Le graphique 7 présente l'intensité de la coopération internationale en matière de brevets nanotechnologiques pour une sélection de pays. L'intensité de la coopération est mesurée par la proportion de brevets de nanotechnologie dont les inventeurs sont originaires du pays concerné et dans lesquels des inventeurs d'autres pays ont été impliqués. Il existe de nettes différences entre les membres de l'UE ainsi que par rapport à la Chine et aux États-Unis. Au cours de la période 2005-2012, l'intensité de la coopération internationale a été particulièrement élevée en Chine. En Europe, les inventeurs français (environ 35 %) ont été les plus impliqués dans les réseaux internationaux de brevets. Au cours de la période suivante (2013-2020), les schémas ont été légèrement différents. Néanmoins, il est frappant de constater que l'intensité de la coopération internationale des membres de l'UE décrits est toujours plus élevée que celle des États-Unis. Cela reflète en partie le fort potentiel d'innovation national des États-Unis. En outre, lorsque l'on compare les deux périodes, le déclin significatif de l'intensité de la coopération internationale de la Chine est frappant. Cela peut, dans une certaine mesure, être le résultat d'une coupure des liens avec la recherche internationale induite par la politique, mais pourrait également témoigner d'un besoin réduit d'apport de connaissances extérieures.

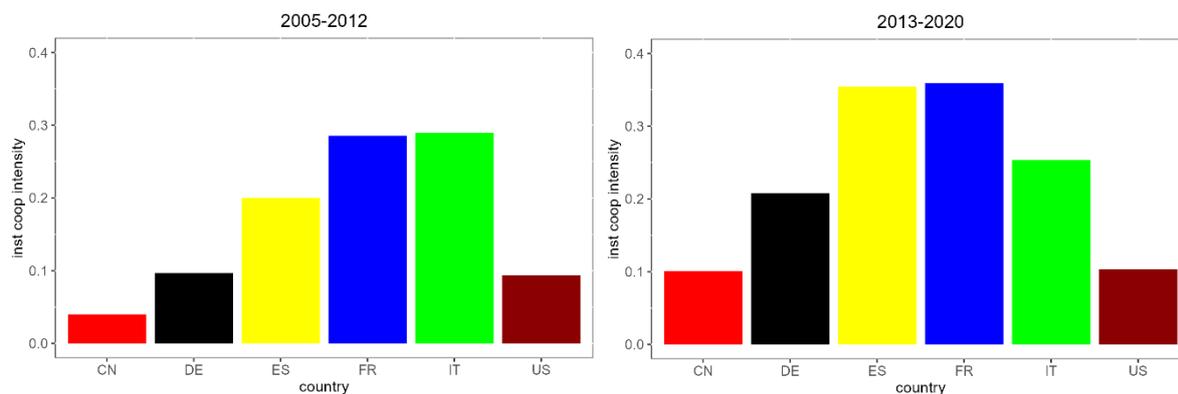
Graphique 7 : Intensité de la coopération transfrontalière en matière de brevets nanotechnologiques, par pays



Sources : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels.

Enfin, nous pouvons également illustrer l'intensité de la coopération en matière de recherche entre différents types d'institutions. La base de données PATSTAT n'offre pas seulement les noms et adresses des inventeurs, mais aussi au moins une délimitation générale des types d'institutions auxquelles les demandeurs de brevets peuvent être rattachés. Plus précisément, elle distingue des types tels que « entreprise », « gouvernement », « université » et « organisation à but non lucratif ». Comme la littérature sur l'économie de l'innovation suggère que la coopération entre les entreprises et les instituts de recherche peut jouer un rôle essentiel dans l'exploitation du potentiel d'innovation, nous tiendrons également compte de cette information. Dans ce qui suit, nous parlons de coopération interinstitutionnelle en relation avec une demande de brevet si des déposants de différents types d'institutions sont signalés. Le graphique 8 présente une comparaison par pays des degrés de coopération qui en résultent. Au cours des deux périodes, les membres de l'UE ont affiché des valeurs beaucoup plus élevées pour cet indicateur que la Chine et les États-Unis. La France, en particulier, se distingue par un degré élevé de coopération interinstitutionnelle au cours des deux périodes.

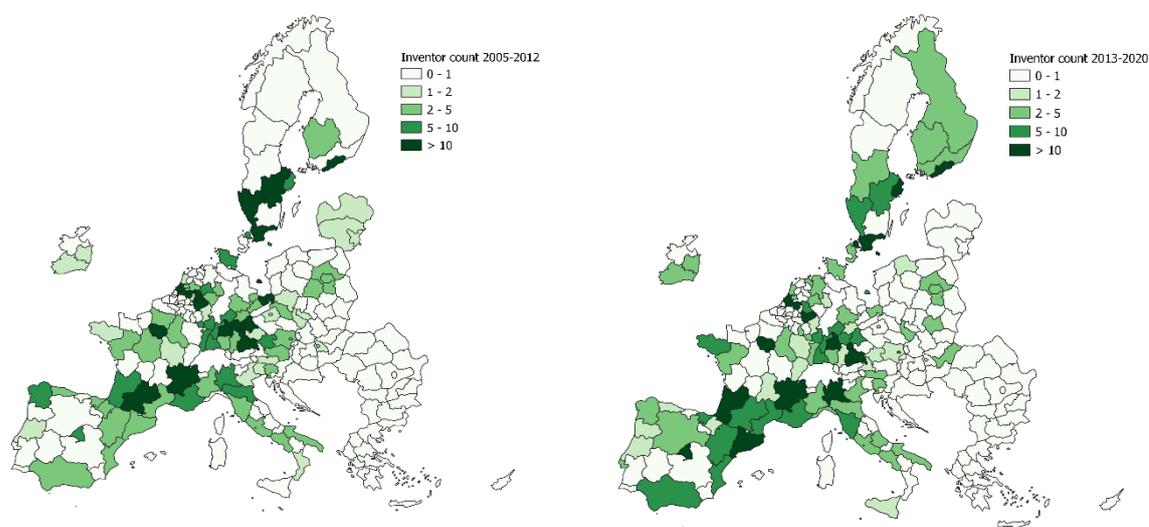
Graphique 8 : Degré de coopération interinstitutionnelle en matière de brevets nanotechnologiques par pays



Sources : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels.

Notre base de données permet une ventilation spatiale encore plus poussée de l'activité en matière de brevets dans le domaine des nanotechnologies au sein de l'UE. Le REGPAT contient également des indicateurs pour l'attribution des adresses de résidence des inventeurs aux régions NUTS. Dans ce qui suit, nous choisissons le niveau NUTS-2 pour la comparaison spatiale. La carte 9 illustre le niveau annuel moyen de notre mesure du *nombre d'inventeurs*, ventilé entre les périodes 2005-12 et 2013-20. D'une manière générale, une nette fracture est-ouest est évidente. Dans les États membres occidentaux, il est possible d'identifier des centres spatiaux d'activité d'innovation marqués. La région NUTS 2 où l'activité en matière de brevets a été de loin la plus forte au cours des deux périodes est *Rhône-Alpes* (FRK2). Au cours de la dernière période 2013-20, elle est suivie par l'*Île-de-France* (FR10) et la *Haute-Bavière* (DE21). Ces trois régions se caractérisent par un degré généralement élevé d'agglomération industrielle, ce qui souligne l'importance des économies d'échelle externes interindustrielles. Les groupements macro-régionaux les plus importants au cours des deux périodes sont le sud de la France (plus la Catalogne) et le sud/sud-ouest de l'Allemagne. Outre cette continuité, une comparaison entre les deux périodes montre également des signes d'un déplacement progressif de l'activité d'innovation. Par exemple, la Finlande et certaines régions d'Espagne ont pu gagner du terrain au cours de la période la plus récente.

Carte 9 : Répartition des demandes de brevet en nanotechnologie par région NUTS-2 (mesure du nombre d'inventeurs)



Sources : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; calculs personnels.

4.3 Les moteurs de l'innovation en matière de nanotechnologies dans l'UE

Nous examinons à présent les facteurs à l'origine de la structure des innovations nanotechnologiques dans les régions NUTS-2 de l'UE. Nous mesurons le niveau annuel d'innovation nanotechnologique dans une région par le nombre de familles de brevets différentes pour lesquelles les inventeurs de la région ont déposé des demandes de brevet (*fam_count*). Les demandes multiples au sein d'une même famille de brevets ne sont donc comptabilisées qu'une seule fois. Cela permet de s'assurer que nous ne comptons que des inventions techniquement différentes (voir la section précédente).

Nous nous intéressons particulièrement à l'impact de la coopération interrégionale et interinstitutionnelle en matière de recherche. La promotion de réseaux d'innovation suprarégionaux solides a toujours été un objectif du soutien de l'UE à la R&D, à la fois en général et spécifiquement pour des domaines d'intérêt tels que les nanotechnologies. Jusqu'à présent, cependant, on manque encore de preuves de l'importance réelle de cette maxime pour le succès de la recherche dans les nanotechnologies, en particulier en ce qui concerne la qualité des brevets qui en résultent. De même, le rôle de la coopération entre les institutions n'a pas encore été exploré.

Pour parvenir à des relations vérifiables, les influences sur les activités d'innovation qui sont liées au temps et au lieu doivent également être prises en compte. Notre ensemble de données régionales sur les brevets, qui est étendu à la fois dans le temps et dans l'espace, constitue une base idéale à cet égard. Dans ce qui suit, nous l'utilisons pour notre propre analyse économétrique. Suivant une procédure couramment utilisée dans la littérature, nous fusionnons l'ensemble de données sur les brevets avec un ensemble d'indicateurs régionaux de l'UE provenant d'Eurostat⁷⁰. Le choix de variables de contrôle régionales est limité par le fait qu'aucune caractéristique régionale spécifique au secteur n'est disponible, étant donné que les nanotechnologies sont de nature transversale (voir la sous-section 4.1). En raison de la granularité plus grossière des mesures de comptabilité économique

⁷⁰ Eurostat (2024). [Statistiques régionales par nomenclature NUTS](#). Base de données Eurostat.

sectorielle telles que la valeur ajoutée au niveau régional, celles-ci ne peuvent être construites à partir des données existantes pour les régions NUTS-2. Toutefois, nous pouvons nous appuyer sur des indicateurs agrégés pour les secteurs de la fabrication de haute technologie et de la recherche, qui sont généralement collectés sur une base régulière. Une autre limite est la nécessité de disposer d'une série temporelle suffisamment longue pour une analyse dynamique. Par conséquent, certains indicateurs régionaux intéressants (par exemple ceux de l'indice de compétitivité régionale de l'UE) qui n'ont été collectés que très récemment ne peuvent pas être intégrés.

Nous évaluons approximativement l'ampleur de l'apport régional direct en R&D à l'aide des données d'Eurostat sur les ressources humaines en sciences et technologies, en particulier le nombre de scientifiques et d'ingénieurs travaillant dans la région (*HRST*). Les effets potentiels du degré d'agglomération économique régionale sur le succès de la recherche (par exemple, par le biais d'économies d'échelle externes à l'industrie) sont pris en compte en utilisant le PIB régional par habitant comme variable de contrôle (*PIB_pc*). Nous estimons le niveau général du capital cognitif local (un facteur d'influence possible sur l'adoption des connaissances créées et leur mise en œuvre dans l'innovation future)⁷¹ sur la base de la part des 25-64 ans ayant suivi un enseignement supérieur (*tert_ed*). Outre l'intensité de la coopération interrégionale (*reg_coopins*), nous considérons l'intensité de la coopération interinstitutionnelle (voir la sous-section précédente) comme une mesure de la coopération (*inst_coopins*). Cette mesure évalue l'importance des réseaux de connaissances interinstitutionnels, par exemple les universités partageant régulièrement les derniers résultats de la recherche académique avec les entreprises privées et les producteurs partageant leur expérience de la production avec le monde académique.

En outre, nous utilisons le décalage de l'indicateur du nombre d'inventeurs comme facteur explicatif supplémentaire des statistiques sur les brevets (*inv_count*). Il mesure l'importance potentielle de l'engagement régional passé dans les activités de brevet pour la quantité et la qualité des innovations futures. Il reflète donc les dépendances de sentier dans les processus d'innovation, c'est-à-dire l'utilisation des connaissances générées pour des innovations ultérieures. Pour réduire les problèmes d'endogénéité et tenir compte du décalage temporel dans la création d'innovations, tous les facteurs explicatifs sont inclus dans le modèle sous forme décalée (décalage d'un an), conformément à une recommandation de la littérature⁷². Enfin, pour contrôler l'influence des effets dépendants du temps, nous incluons des variables indicatrices de l'année dans le modèle.

Lors de la sélection de la méthode d'estimation, le nombre important de valeurs nulles pour les variables dépendantes dans l'ensemble de données initial doit être traité avec précaution. Toutes les régions NUTS-2 ne possèdent pas, loin s'en faut, de capacités de R&D dans le segment des nanotechnologies. Certaines régions n'ont généré aucun brevet dans le domaine des nanotechnologies sur l'ensemble de la période de l'échantillon. Elles ont été omises de l'estimation, car il est peu probable que des efforts sérieux aient été déployés pour mener des recherches commerciales dans le domaine des nanotechnologies. Un autre groupe de régions a généré des brevets nanotechnologiques au cours de la période d'échantillonnage, mais pas chaque année. Étant donné que nous ne pouvons

⁷¹ Caragliu, A. et Nijkamp, P. (2012). The impact of regional absorptive capacity on spatial knowledge spillovers : the Cohen and Levinthal model revisited (L'impact de la capacité d'absorption régionale sur les retombées des connaissances spatiales : le modèle de Cohen et Levinthal revisité). *Applied Economics*, 44(11), 1363-1374.

⁷² Kekezi, O., Dall'erba, S. et Kang, D. (2022). The role of interregional and inter-sectoral knowledge spillovers on regional knowledge creation across US metropolitan counties. *Spatial Economic Analysis*, 17(3), 291-310.

pas supposer que ces modèles sont aléatoires, nous ne devrions pas simplement éliminer ces valeurs nulles. Au lieu de cela, nous nous inspirons de l'approche classique du modèle de sélection établie par James Heckman⁷³. Le mécanisme sous-jacent aux observations est divisé en deux processus. Un processus qui détermine l'existence de valeurs positives (c'est-à-dire l'existence d'une activité de brevet) et un processus qui détermine le niveau de ces valeurs positives (c'est-à-dire l'étendue de l'activité de brevet). Pour appliquer la méthode, une variable doit être définie comme une restriction d'exclusion et n'apparaître que dans l'équation de sélection. Pour ce faire, nous choisissons la variable de l'éducation, en partant du principe qu'un minimum de capital humain est nécessaire dans la région pour susciter une innovation dans un domaine aussi pointu. Le modèle de Heckman avec effets fixes dans le temps a été estimé sur la base d'un total de 1 933 observations. Pour l'estimation pratique, nous avons utilisé le paquet statistique *sampleSelection* intégré dans le logiciel *R*. Le tableau A1 de l'annexe montre les estimations des coefficients qui en résultent.

Les variables considérées ont des effets hétérogènes sur l'existence et l'étendue de l'activité de brevetage en nanotechnologie dans les régions de l'UE. Le nombre d'innovations retardé et la variable HRST présentent dans les deux étapes des coefficients hautement significatifs et positifs. Comme on pouvait s'y attendre, cela indique le rôle prépondérant des réserves régionales de chercheurs et des dépendances à l'égard de l'activité d'innovation. Les rôles des deux variables de coopération sont moins faciles à cerner. Le coefficient positif de l'intensité de la coopération interrégionale est légèrement significatif dans l'équation de sélection et hautement significatif dans l'équation de résultat. Étant donné que nous vérifions le PIB par habitant et l'activité régionale passée des inventeurs, il ne s'agit pas simplement de l'expression d'un plus grand rayonnement spatial des régions d'agglomération axées sur la recherche. Pour un niveau donné d'activité actuelle des inventeurs, une proportion plus élevée de coopération interrégionale en matière de brevets est associée à une plus grande réussite de la recherche à l'avenir.

La deuxième variable de coopération, la mesure de la coopération interinstitutionnelle, est légèrement significative dans l'équation de sélection et non significative dans l'équation de résultat. Cela suggère que le degré de coopération interinstitutionnelle détermine principalement les chances d'une région de rester innovante en matière de nanotechnologies à l'avenir. Compte tenu des difficultés de délimitation des types d'institutions dans PATSTAT, cela n'indique toutefois pas nécessairement un manque total d'importance pour l'ampleur de l'innovation future en matière de nanotechnologies. En outre, une forme non observée de valeur ajoutée pourrait consister à stimuler les activités de brevetage dans des groupes technologiques ne relevant pas de notre définition des nanotechnologies. Cela motive l'inclusion de sources de données supplémentaires (par exemple au niveau de l'entreprise) afin de refléter plus fidèlement le contexte sectoriel des inventeurs enregistrés. En général, étant donné l'absence de mesures permettant de vérifier les différences d'infrastructure régionale, il convient de faire preuve d'une grande prudence dans l'inférence de la causalité.

⁷³ Heckman, J. J. (1979). Sample selection bias as a specification error. *Econometrica : Journal of the econometric society*, 153-161.

5 Implications politiques

5.1 Champs d'action

La stratégie de la Commission visant à garantir la compétitivité industrielle de l'UE en jouant un rôle de pionnier dans le domaine des matériaux avancés exige une mise en commun cohérente de toutes les ressources. L'objectif principal doit être d'accroître la rapidité et l'efficacité des processus de développement. Cela nécessite un degré élevé d'alignement stratégique entre les régulateurs et les parties prenantes privées dans l'UE. La définition envisagée de domaines prioritaires mettant l'accent sur la transformation verte et la numérisation est la bonne approche. Toutefois, la contribution des différents domaines de recherche aux objectifs de transformation ne doit pas être définie de manière trop étroite. La perspective systémique est cruciale. Même les matériaux qui ne possèdent pas de propriétés environnementales supérieures ou qui sont nécessaires aux technologies numériques devraient bénéficier d'une priorité stratégique s'ils accélèrent la transformation des chaînes d'approvisionnement dans leur ensemble. Cela s'applique, par exemple, aux matériaux qui peuvent remplacer des matières premières critiques rares et auparavant indispensables et soutenir ainsi la mise en œuvre de chaînes d'approvisionnement neutres en termes d'émissions ou numériques. L'identification et la mise à jour des domaines prioritaires de la recherche sur les matériaux devraient donc se fonder sur un système de suivi basé sur des indicateurs. Ce système devrait appliquer des méthodes d'analyse du cycle de vie environnemental et économique afin d'identifier et d'actualiser en permanence les besoins du point de vue de la chaîne de valeur.

Outre le suivi stratégique, la mise en place et la gestion d'une infrastructure de collaboration ouverte pour le développement des matériaux devraient devenir une priorité. La complexité et la diversité des besoins en connaissances exigent une coopération accrue dans au moins quatre dimensions : le long des chaînes de valeur, entre les secteurs économiques, entre les institutions (entreprises, recherche, régulateurs) et entre les disciplines de recherche. Notre analyse empirique des facteurs influençant l'innovation dans le domaine des nanotechnologies souligne également l'importance des réseaux de R&D suprarégionaux (voir la section 4.3). Ce n'est que si l'Europe parvient à canaliser et à maximiser le flux interne de connaissances qu'elle pourra compenser des désavantages structurels tels que la disponibilité limitée de capital-risque. L'infrastructure nécessaire à cet effet comporte des composantes numériques et analogiques. Au niveau numérique, des interfaces doivent être créées via un espace de données commun afin de créer un pool de données partagé. La tâche des régulateurs est de veiller à ce que les principes FAIR (voir sous-section 3.3) soient appliqués afin d'éviter les inefficacités et l'émergence de nouveaux monopoles de l'information. Au niveau analogique, le développement d'infrastructures d'essai communes et ouvertes pour les nouveaux matériaux devrait être encouragé plus fortement. Pour ce faire, il convient de rechercher une coopération institutionnelle étroite avec les investisseurs en capital-risque. Les développeurs de matériaux disposant de budgets plus modestes peuvent ainsi bénéficier de manière égale des possibilités d'essai de leurs prototypes et de l'établissement de contacts en vue d'une commercialisation ultérieure.

Enfin, l'UE devrait intégrer le domaine des matériaux avancés en tant que composante stratégique de ses politiques économiques extérieures, en particulier de ses politiques en matière de commerce et de ressources. Lors de la négociation de nouveaux accords de libre-échange ou de partenariats stratégiques avec des pays tiers, la perspective d'un échange de connaissances et d'un accès aux

infrastructures de recherche de l'UE peut constituer un atout important dans le processus de négociation. Les offres de coopération à long terme dans le domaine du développement des matériaux, de la protection de la propriété intellectuelle et de la définition de normes communes pour les propriétés des matériaux et le traitement de l'information pourraient renforcer le poids géoéconomique de l'Europe.

5.2 Recommandations

- 1. Réexaminer la réglementation des produits du point de vue de la facilité d'innovation :** Le cadre réglementaire applicable au développement des matériaux dans l'UE (voir le point 3.2) et dans les États membres devrait être examiné en vue d'encourager l'innovation. Compte tenu de la perspective d'une forte augmentation des prix du CO₂ et de la pression croissante de la demande en faveur d'une plus grande durabilité, la nécessité d'exigences réglementaires détaillées telles que celles définies par le règlement de l'UE sur l'écoconception devrait être examinée en détail. La grande complexité de la réglementation n'augmente pas seulement les coûts d'information et de suivi des processus d'innovation. Elle pourrait également entraver le développement de matériaux supérieurs du point de vue de la chaîne d'approvisionnement. Un exemple serait le développement de matériaux révolutionnaires qui n'offrent pas d'avantages immédiats en termes de durabilité, mais qui provoquent par conséquent l'établissement de chaînes d'approvisionnement nationales entièrement nouvelles et donc le remplacement de la production nuisible à l'environnement établie dans des pays tiers. Les compromis environnementaux potentiels dans le développement des matériaux devraient donc être décidés par les acteurs des processus d'innovation, dans le cadre défini par la législation générale de l'UE en matière d'environnement et de climat. La réglementation devrait plutôt s'attacher à soutenir le développement de systèmes volontaires de certification et d'étiquetage qui rendent l'empreinte environnementale des produits utilisant des matériaux avancés transparente pour les consommateurs. Enfin, le concept de « bacs à sable » réglementaires, qui a déjà été testé dans d'autres domaines technologiques (par exemple l'hydrogène renouvelable), devrait également être appliqué à la phase d'essai des matériaux innovants.
- 2. Rationalisation des systèmes de financement pour le développement et le déploiement de matériaux innovants :** Les canaux de financement existants au niveau de l'UE et des États membres devraient être rationalisés en établissant des priorités de financement stratégiques communes. Celles-ci ne devraient pas se limiter au soutien du développement et des essais en laboratoire, mais devraient inclure les premières étapes de la commercialisation. Les programmes de financement devraient être coordonnés avec le financement des technologies en aval par la plateforme STEP (voir sous-section 3.2). Le rôle transversal des technologies numériques (par exemple la diffusion des données de développement, le suivi des produits, l'information des consommateurs) devrait être reconnu par un financement spécifique de l'innovation numérique. Dans le cadre du financement des initiatives de recherche, l'accent devrait être mis sur les consortiums qui présentent un degré élevé d'intégration de la chaîne de valeur et une ouverture aux parties prenantes de différents types d'institutions (par exemple, les entreprises privées, les universités, les centres de recherche).

-
- 3. Renforcer la base de connaissances :** Les pénuries de jeunes talents et de professionnels expérimentés dans le domaine de la recherche et de la fabrication de matériaux doivent être résolues de manière ciblée. Une étape importante consiste à développer des programmes d'études universitaires étroitement adaptés aux besoins d'une industrie fortement axée sur la recherche. Les programmes de maîtrise spécialisés qui impliquent un échange intensif avec les entreprises manufacturières locales peuvent jeter les bases d'« usines à talents » régionales en surmontant les problèmes d'adéquation sur les marchés du travail locaux et en fournissant aux entreprises un flux fiable de travailleurs hautement qualifiés. En outre, les flux de connaissances le long des chaînes d'approvisionnement devraient être renforcés en soutenant les technologies de suivi numérique des matériaux. Cela peut améliorer la souveraineté des consommateurs (par exemple, les passeports numériques des produits), faciliter les améliorations de la conception (par exemple, les jumeaux numériques) et permettre la cocreation. Une attention particulière devrait être accordée à l'intégration de l'IA dans les infrastructures de recherche, avec l'idée de laboratoires autopilotés comme vision centrale.
- 4. Prévaloir la contestabilité des marchés intérieurs des matériaux :** Afin de maintenir la compétitivité de l'Europe sur les marchés mondiaux des matériaux, il serait judicieux de regrouper les ressources décentralisées de R&D au sein de grands consortiums intersectoriels. En même temps, il faut veiller à ce que cela n'aboutisse pas à des clubs fermés qui compromettent la concurrence interne sur les marchés européens à moyen terme. En particulier, les obstacles à l'accès des jeunes entreprises et des petites et moyennes entreprises (PME) aux réseaux de R&D compétitifs doivent être supprimés. Outre la garantie d'une ouverture des infrastructures de recherche fondée sur des règles (voir le point 2), cela nécessite également un soutien spécifique aux PME. Pour renforcer les retombées de la connaissance, l'attribution de bons de R&D est un moyen plus efficace que le financement par des subventions de recherche isolées⁷⁴. Les grandes entreprises qui concluent des partenariats de R&D avec des PME peuvent échanger ces bons et recevoir un paiement. Cela renforce l'attrait des PME en tant que partenaires des réseaux de R&D établis, sans que l'État n'intervienne directement dans les programmes de recherche privés. Les fonds de capital-risque publics-privés pourraient également constituer un moyen approprié de promouvoir la commercialisation des innovations de démarrage. Les investissements de la Banque européenne d'investissement (BEI) dans des fonds de capital-risque gérés par le secteur privé et soutenus par des acteurs industriels expérimentés sont un bon moyen de garantir une utilisation ciblée des fonds. En outre, les États membres devraient examiner les possibilités d'incitations fiscales ciblées pour le capital-risque (par exemple, le traitement des reports de pertes en cas de changement d'actionnaires) dans le cadre de leurs systèmes fiscaux nationaux. Enfin, tous les instruments ciblant les matériaux avancés devraient faire l'objet d'une vérification régulière de leur compatibilité avec les PME.
- 5. Exploiter les innovations matérielles pour atteindre l'objectif d'autonomie stratégique ouverte :** Avec le paradigme de « l'autonomie stratégique ouverte », élaboré dans son examen de la politique

⁷⁴ Sala, A., Landoni, P. et Verganti, R. (2016). Collaborations des petites et moyennes entreprises avec des services à forte intensité de connaissances : An explorative analysis of the impact of innovation vouchers. *R&D Management*, 46(S1), 291-302.

commerciale 2021⁷⁵, l'UE cherche à aligner l'idée d'un commerce mondial ouvert et fondé sur des règles avec la création d'une plus grande marge de manœuvre pour ses propres actions unilatérales de politique commerciale et une réduction des dépendances extérieures. Pour renforcer son poids géostratégique et obtenir de nouveaux partenariats pour la diversification des routes commerciales, l'UE doit faire valoir tous ses atouts. Cela inclut actuellement, en particulier, sa capacité exceptionnelle d'innovation en matière de matériaux dans divers segments de l'industrie (voir sous-section 2.3). L'offre de coopération en matière de développement de matériaux devrait faire partie intégrante du rayonnement mondial de l'UE, en impliquant les négociations sur les futurs accords commerciaux, les partenariats stratégiques en matière de ressources ainsi que l'initiative « Global Gateway ».

6 Conclusion

La concurrence pour le leadership technologique mondial a été complètement rééquilibrée par l'avancée des technologies numériques et neutres sur le plan climatique. Plutôt que d'améliorer progressivement la productivité, il s'agit de concevoir, de mettre en œuvre et de sécuriser des chaînes d'approvisionnement entièrement nouvelles. Dans cette course, l'Europe a pris du retard en tant que site de production en raison d'une attitude hésitante à l'égard de la promotion de nombreuses nouvelles technologies clés telles que l'énergie photovoltaïque et la production de batteries. Dans la situation actuelle, au lieu de se lancer dans une compétition ruineuse en matière de subventions pour récupérer les capacités perdues, l'Europe devrait se concentrer sur une meilleure utilisation de ses propres forces.

Celles-ci se situent principalement dans le domaine de la recherche sur les matériaux. Le potentiel d'innovation de l'UE dans les matériaux aux propriétés cruciales pour la mise en œuvre des technologies futures reste très élevé, tant par l'étendue des domaines d'application que par la diversité des entreprises et des institutions de recherche participantes. Il s'agit là d'un avantage stratégique considérable. Le groupe des matériaux avancés peut devenir une solution miracle pour la double transition en augmentant l'efficacité des technologies futures et en résolvant les compromis techniques existants entre les objectifs de durabilité. Toutefois, pour que l'Europe traduise cet avantage en valeur ajoutée industrielle et en emplois sûrs, un effort coordonné de toutes les parties prenantes est nécessaire. Les silos de connaissances doivent être brisés et le potentiel des technologies numériques, en particulier l'IA, doit être pleinement exploité pour optimiser le flux de connaissances spécialisées au sein de l'UE.

Les réseaux de connaissances efficaces nécessitent une coopération dans plusieurs dimensions, comme le souligne notre analyse des nanotechnologies. Cela concerne l'échange de connaissances entre les groupements régionaux, les disciplines de recherche, les secteurs économiques et les différents types d'institutions. En même temps, le besoin d'échange ne concerne pas seulement la recherche et le développement, mais aussi l'information tout au long de la chaîne d'approvisionnement, y compris la phase d'utilisation et l'utilisation finale. La mise en place d'une infrastructure de soutien numérique et analogique commune est une étape importante vers

⁷⁵ Commission européenne (2021a). Examen de la politique commerciale - Une politique commerciale ouverte, durable et dynamique. Communication au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen, au Comité des régions et à la Banque européenne d'investissement. COM/2021/66 final.

l'élimination des obstacles à la commercialisation et à l'extension des lignes de production de matériaux innovants. Elle devrait servir de complément à des mesures d'importance plus générale, telles que la qualification des travailleurs et la promotion des marchés de capital-risque.

L'un des principaux défis d'une stratégie de développement tournée vers l'avenir consiste à trouver le juste équilibre entre coopération et concurrence. Du point de vue de l'UE, cela vaut à la fois pour l'intérieur et pour l'extérieur. Sur le plan interne, la stratégie de mise en commun des ressources et la priorité accordée aux domaines de recherche essentiels à la double transition doivent être mises en équilibre avec le désir de maintenir la capacité d'adaptation à l'évolution des conditions du marché. Une stratégie à deux niveaux se justifie dans ces circonstances. Elle limite les structures de gouvernance centrale au niveau supérieur de la définition des grands domaines stratégiques. Dans ces domaines, le pilotage décentralisé est assuré par des systèmes de financement public compétitifs et par l'ouverture de l'accès aux infrastructures de recherche. Dans le même temps, il faut veiller à ce que la création et le renforcement de grands conglomérats de recherche n'entravent pas la concurrence des idées pour des solutions matérielles tournées vers l'avenir. Le système doit rester ouvert aux visions perturbatrices d'acteurs qui ne sont pas en position de force sur le marché. À cette fin, des instruments incitatifs sont nécessaires pour intégrer les jeunes entreprises et les PME spécialisées dans les réseaux de connaissances établis. L'attribution de bons aux entreprises à fort potentiel de recherche, qui peuvent être échangés en entrant dans une coopération de R&D avec des petites entreprises, pourrait être une option appropriée.

Sur le plan extérieur, l'UE doit préciser sa stratégie dans le domaine de la coopération technologique internationale. Dans un paysage mondial de la recherche hautement spécialisé et intégré, le leadership technologique ne peut être obtenu par un découplage des réseaux de coopération mondiaux. Les intérêts de sécurité et la crainte d'une fuite indésirable des connaissances ne doivent pas conduire la recherche européenne à un splendide isolement. Au contraire, l'UE devrait adopter une stratégie de confiance en soi et utiliser sa force dans le domaine de la recherche sur les matériaux comme un atout pour forger de nouvelles alliances technologiques. Celles-ci peuvent devenir un nouvel élément constitutif de l'objectif global de création de chaînes d'approvisionnement internationales diversifiées, et donc d'une véritable autonomie stratégique ouverte.

7 Annexe

Tableau A1 : Déterminants de l'innovation régionale en matière de nanotechnologies - Résultats de la régression selon le modèle de Heckman

	Variable dépendante : fam_count					
	Équation de sélection			Équation de résultat		
	Estimation	Erreur std.	Valeur p	Estimation	Erreur std.	Valeur p
Régresseurs						
intercepter	-1.424	0.153	< 2e-4***	-2.127	0.986	0.031**
inv_count (lag)	0.104	0.018	< 2e-4***	0.464	0.028	< 2e-4***
HRST (décalage)	0.396	0.043	< 2e-4***	0.919	0.124	< 2e-4***
tert_ed (lag)	0.257	0.122	0.035**	-	-	-
PIB_pc (décalage)	0.180	0.098	0.065*	0.573	0.337	0.089*
reg_coopins (lag)	0.170	0.084	0.043**	0.746	0.275	0.007***
inst_coopins (lag)	0.299	0.146	0.040**	0.281	0.423	0.507
Année 2010	0.385	0.156	0.014**	1.878	0.522	< 2e-4***
Année 2011	0.507	0.156	0.001***	1.720	0.523	0.001***
Année 2012	0.282	0.157	0.072*	0.908	0.512	0.076*
Année 2013	0.417	0.157	0.008***	1.178	0.511	0.021**
Année 2014	-0.059	0.157	0.709	-0.905	0.517	0.080*
Année 2015	-0.236	0.160	0.139	0.093	0.547	0.865
Année 2016	-0.104	0.159	0.514	-0.198	0.530	0.709
Année 2017	-0.016	0.158	0.917	-0.039	0.518	0.940
Année 2018	-0.059	0.157	0.709	-0.578	0.515	0.262
Année 2019	-0.344	0.162	0.034**	-0.914	0.554	0.099*
Année 2020	-0.437	0.165	0.008***	-1.098	0.564	0.052*
Rapport inverse des moulins	-	-	-	2.133	0.545	< 2e-4***
Adj. R ²	0.544					
Pas d'observations	1,933					

Sources : OEB (2024) ; OCDE (2024) ; Eurostat (2024) ; OEB (2024) ; OCDE (2024) ; Eurostat (2024) ; calculs personnels. Codes de signification : 0,01 « *** » 0,05 « ** » 0,1 « * »

**Auteur :**

Dr. André Wolf

Chef de la division « Technologie, infrastructure et développement industriel »

wolf@cep.eu

Traduit depuis l'allemand par Thomas Plancq, chargé de communication

Centrum für Europäische Politik FREIBURG | BERLIN

Kaiser-Joseph-Straße 266 | D-79098 Freiburg

Schiffbauerdamm 40 Räume 4205/06 | D-10117 Berlin

Tél. + 49 761 38693-0

Le **Centrum für Europäische Politik** FREIBURG | BERLIN, le **Centre de Politique Européenne** PARIS, et le **Centro Politiche Europee** ROMA forment ensemble le **réseau des Centres de Politique Européenne** FREIBURG | BERLIN | PARIS | ROMA.

Exempt d'intérêts particuliers et neutre sur le plan politique, le réseau des Centres de Politique Européenne fournit une analyse et une évaluation de la politique de l'Union européenne, dans le but de soutenir l'intégration européenne et de défendre les principes d'un système économique de libre-échange.