



HAL
open science

Des idées sans échelle

Johanna Deperi, Ludovic Dibiaggio, Mohamed Keita, Lionel Nesta

► **To cite this version:**

Johanna Deperi, Ludovic Dibiaggio, Mohamed Keita, Lionel Nesta. Des idées sans échelle. OFCE Policy Brief, 2023, 115, pp.1-20. hal-04081377

HAL Id: hal-04081377

<https://sciencespo.hal.science/hal-04081377v1>

Submitted on 25 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

DES IDÉES SANS ÉCHELLE¹

L'intelligence artificielle *Made in France* en mal de débouchés

Johanna Deperi*, Ludovic Dibiaggio, Mohamed Keita, Lionel Nesta

Johanna Deperi, Université de Brescia, Italie

Ludovic Dibiaggio, Mohamed Keita, SKEMA Business School

Lionel Nesta, OFCE Sciences Po, Université Côte d'Azur CNRS-GREDEG, SKEMA Business School

* Johanna Deperi remercie le financement « European Research Council » (ERC) dans le cadre du programme de l'Union européenne Recherche et Innovation Horizon 2020 (ERCStG 2D4D « Disruptive Digitalization for Decarbonization », convention de subvention n°853487).

Résumé

Perçue comme la promesse de machines « intelligentes », l'intelligence artificielle (IA) est annoncée comme la source de bouleversements industriels à la mesure des révolutions majeures du XX^e siècle. Ce *Policy brief* a pour ambition d'identifier les atouts et les faiblesses de la France dans cette grande course à l'innovation IA. Nous caractérisons la position de la France dans le jeu concurrentiel et faisons les observations suivantes :

1. Sans être un leader mondial de l'innovation incorporant de l'intelligence artificielle, la France montre une activité modérée mais significative dans ce domaine ;
2. La France est spécialisée en apprentissage automatique, en apprentissage non supervisé et en modèles graphiques probabilistes, et dans le développement de solutions liées aux sciences médicales, aux domaines des transports et de la sécurité ;
3. La chaîne de valeur IA en France est faiblement intégrée. Cela vient pour l'essentiel d'un manque d'intégration dans les phases en aval de la chaîne de l'innovation ;
4. La faible présence des acteurs privés français au niveau mondial contraste avec la forte implication des acteurs publics français. Les institutions de recherche publique françaises produisent donc des brevets à forte valeur économique ;
5. Les réseaux français de collaboration dans le développement des brevets sont portés par les acteurs publics mais ceux-ci sont faiblement ouverts à l'international et à la mixité institutionnelle.

Selon nous, la France court le risque d'être un laboratoire mondial de l'IA, situé en amont des activités d'innovation proprement dites, supportant les coûts fixes et irrécouvrables, sans trouver le relais nécessaire au niveau national à tout le moins quant à leur exploitation à plus grande échelle. Notre crainte est que la technologie IA *Made in France* se trouve sans débouché national à terme et soit exportée pour prospérer ailleurs.

1. Ce *Policy brief* s'inspire du rapport « Intelligence artificielle : technologies et acteurs clefs » (SKEMA Business School, 2022) ; les propos développés ici par les auteurs n'engagent qu'eux-mêmes.

Perçue comme la promesse de machines « intelligentes », l'intelligence artificielle (IA) est annoncée comme la source de bouleversements industriels à la mesure des révolutions majeures du XX^e siècle. Ce *Policy brief* a pour ambition d'identifier les atouts et les faiblesses de la France dans cette grande course à l'innovation. Définie comme une technologie de la prédiction, l'IA est pressentie comme une technologie d'application générale (*General Purpose Technology, GPT*) (Bresnahan et Trajtenberg, 1995). De fait, la compétitivité à moyen et long terme des États se joue à l'aune des investissements scientifiques et technologiques et des choix stratégiques susceptibles d'exploiter le potentiel industriel de l'IA. Au-delà de ces aspects purement quantitatifs, de nombreux économistes s'interrogent sur les effets qualitatifs de l'IA : sur la croissance économique (Aghion *et al.*, 2019), sur le processus concurrentiel (Varian, 2018), sur l'innovation (Cockburn *et al.*, 2019 ; Babina *et al.*, 2021) et bien évidemment l'emploi (Acemoglu et Restrepo, 2019 ; Aghion *et al.*, 2019 ; Agrawal *et al.*, 2019).

Ces enjeux justifient la multiplicité des politiques nationales et l'ampleur des investissements des principaux acteurs de l'IA. À la suite des États-Unis, l'ensemble des pays industrialisés ainsi que les géants industriels se sont lancés dans des stratégies offensives annonçant des plans d'investissements considérables². On estime que l'effet net cumulé sur la croissance économique mondiale serait de 13 000 milliards de dollars d'ici 2030 (Mc Kinsey, 2018)³. Mais cet effet cumulé, pour impressionnant qu'il soit, reste toutefois à prendre avec précaution. L'IA n'est ni une catégorie statistique ni une variable comptable, et son recensement nécessite des stratégies empiriques indirectes, c'est-à-dire diversifiées et innovantes mais toujours imparfaites.

Ce travail s'appuie sur une base de données unique et exhaustive en matière de brevets, PATSTAT (voir l'annexe 1), pour révéler les stratégies d'investissement des pays et des acteurs. Le recours exclusif aux données de brevets présente l'avantage de donner une représentation cohérente des innovations liées à l'IA au niveau international. En revanche, les résultats ne fournissent qu'une lecture partielle de l'innovation en IA. En tant qu'algorithmique, l'IA ne se prête pas naturellement au dépôt de brevet ; ce n'est qu'intégrée dans une technologie matérialisée que celle-ci peut être brevetée⁴.

Nous posons 5 questions relatives à la position de la France dans le jeu concurrentiel international :

1. Quelle est la place de la France dans l'innovation brevetée utilisant des algorithmes d'IA ?
2. Quels sont les domaines de spécialisation de la France ?
3. La chaîne de valeur française en IA est-elle intégrée ?
4. Qui sont les acteurs français de l'IA et quelle est leur place dans le monde ?
5. Quelle est la division du travail entre acteurs privés et acteurs publics ?

Nos résultats suggèrent les réponses suivantes :

1. Sans être un leader mondial de l'innovation incorporant de l'intelligence artificielle, la France montre une activité modérée mais significative dans ce domaine ;
2. La France est spécialisée en apprentissage automatique, en apprentissage non supervisé et en modèles graphiques probabilistes, et dans le développement de solutions liées aux sciences médicales, aux domaines des transports et de la sécurité ;

2. Le rapport de l'OCDE « Identifying and Measuring Developments in Artificial Intelligence: Making the Impossible Possible » (OECD, 2020) en est une excellente illustration.

3. À titre de comparaison, le PIB était de 21 000 milliards de dollars aux États-Unis en 2019, de 18 000 milliards de dollars dans l'Union européenne et de 14 000 milliards de dollars en Chine.

4. En conséquence, l'analyse proposée ne saurait caractériser les activités pures de développement d'algorithmes sans intégration dans un artefact particulier. Pour ce faire, il faudrait par exemple considérer les publications scientifiques, révéler la localisation des institutions et des chercheurs, etc. Les auteurs développent actuellement un travail dans ce sens.

3. La chaîne de valeur IA en France est faiblement intégrée. Cela vient pour l'essentiel d'un manque d'intégration dans les phases en aval de la chaîne de l'innovation ;
4. La faible présence des acteurs privés français au niveau mondial contraste avec la forte implication des acteurs publics français. Les institutions de recherche publique françaises produisent donc des brevets à forte valeur économique ;
5. Les réseaux français de collaboration dans le développement des brevets sont portés par les acteurs publics mais ceux-ci sont faiblement ouverts à l'international et à la mixité institutionnelle.

Selon nous, la France court le risque d'être un laboratoire mondial de l'IA, située en amont des activités d'innovation proprement dites, supportant les coûts fixes et irrécouvrables, sans trouver le relais nécessaire, au niveau national à tout le moins, quant à leur exploitation à plus grande échelle. Bref, notre crainte est que la technologie IA *made in France* se trouve sans débouché national à terme et soit exportée pour prospérer ailleurs.

Quelle est la place de la France dans la production d'innovation brevetée utilisant des algorithmes d'intelligence artificielle ?

Le graphique 1 classe les 10 premiers pays producteurs de brevets. Avec respectivement 30 % et 26 % des brevets IA, les États-Unis et la Chine dominent la production mondiale d'innovation incorporant de l'IA. L'Union européenne et le Japon représentent à eux deux 12 %. Ainsi quatre brevets IA sur cinq émanent de ces quatre premières zones géographiques. La Corée du Sud représente 6 % des brevets IA. Au sein de l'Union européenne, l'Allemagne est le pays le plus actif dans le domaine de l'IA. Le Royaume-Uni, la France, le Canada et Taiwan forment le premier groupe de pays suiveurs. La France apparaît au septième rang mondial avec 2,4 % de la production de brevets IA⁵. Les 10 premiers pays comptabilisent 90 % et les 20 premiers presque 97 %⁶.

Une normalisation par le nombre d'habitants (graphique 2) singularise la Corée du Sud qui produit plus de 1 000 brevets IA par million d'habitants⁷. Avec environ 800 brevets par million d'habitants, le Japon et les États-Unis se distinguent également par une forte intensité en brevets IA. Avec 234 brevets par million d'habitants, l'Europe se montre peu active. Ceci cache une forte disparité entre pays. Les Pays-Bas (574 brevets par million d'habitants), l'Allemagne (475), mais également la Finlande (748) et la Suède (701) se montrent les plus actifs. À l'inverse, l'Italie (72), l'Espagne (69), le Portugal (39), de même que les anciens pays de l'Est, accusent un net retard. Avec 312 brevets par million d'habitants, la France se classe 15^e au niveau mondial et garde une position médiane dans le monde et en Europe.

Premier constat. Avec une part de marché s'élevant à 2,4 % des brevets IA, la France se situe au 7^e rang mondial. Normalisée par le nombre d'habitants, la France se situe au 15^e rang mondial, avec 312 brevets par million d'habitants. Dans l'ensemble, sans être un leader mondial, la France montre une activité modérée mais significative dans ce domaine.

5.

La surprise vient de la différence de cette étude avec le bureau mondial de la propriété intellectuelle (WIPO). Plus précisément, le graphique 1 positionne respectivement le Royaume-Uni et la France au sixième et septième rang dans le classement quand le rapport WIPO (2019) les classe à la douzième et treizième place. Cette différence s'explique par le fait que cette étude tient compte de la localisation des inventeurs de brevets alors que l'étude WIPO s'intéresse au pays de dépôt du brevet, c'est-à-dire le pays dans lequel le brevet confère à son propriétaire un droit de propriété intellectuelle. Ainsi, un brevet déposé aux États-Unis mais dont les inventeurs sont en France est comptabilisé aux États-Unis dans les études du WIPO alors que nous le comptabilisons en France. Selon nous, l'enjeu stratégique des pays est de développer des compétences scientifiques et techniques qui permettent aux pays de participer à l'effort mondial de développement de l'IA. Le fait qu'un brevet soit développé par des inventeurs relevant d'un pays particulier implique que les investissements complémentaires, en termes d'infrastructures, de chercheurs, d'ingénieurs, de système national d'innovation puis de système de formation sous-jacent, etc., aient été réalisés au préalable.

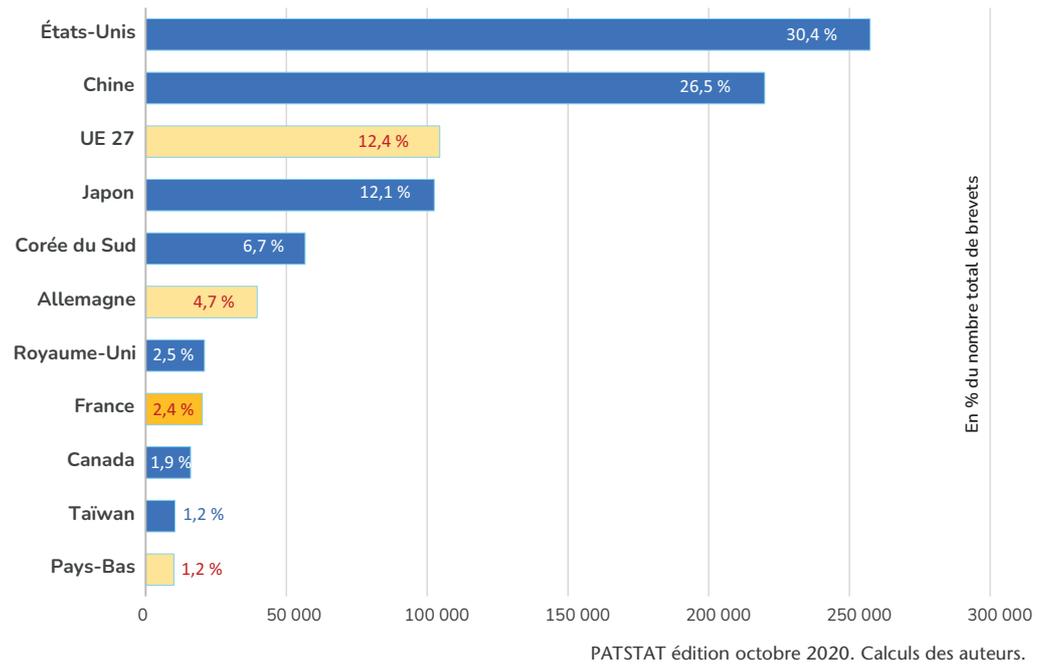
6.

Les 10 pays suivants sont : la Russie (1,1 %) ; Israël (1,1 %) ; la Suisse (1 %) ; l'Inde (1 %) ; la Suède (0,9 %) ; l'Autriche (0,7 %) ; l'Italie (0,5 %) ; la Finlande (0,5 %) ; l'Espagne (0,4 %) ; l'Irlande (0,4 %).

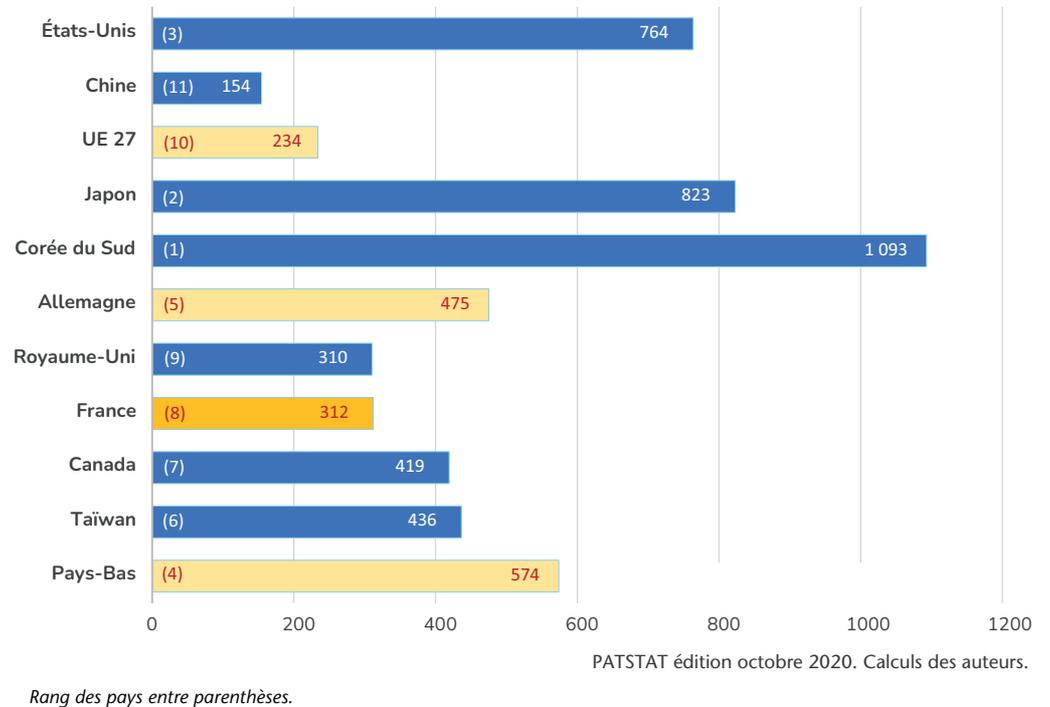
7.

On aurait pu choisir une autre normalisation, comme le PIB, les investissements en R&D, ou encore le nombre total de brevets. Chacune de ces variables induit une normalisation particulière sans qu'aucune ne s'impose naturellement. Par exemple, si on choisit comme normalisation les investissements de R&D du pays, cela produit des statistiques qui qualifient la spécialisation du système de recherche sur l'IA, sans tenir compte de l'intensité du secteur de la recherche dudit pays.

Graphique 1. Classement des 10 principaux pays producteurs de brevets IA (1990-2017)



Graphique 2. Nombre de brevets IA par million d'habitants, parmi les 10 principaux pays producteurs (1990-2017)



Quels sont les domaines de spécialisation de la France ?

Pour caractériser le positionnement des pays, nous mobilisons des données de brevets proposés par PATSTAT et déclinons chaque brevet en trois domaines : techniques IA, fonctions IA et application IA⁸. Les graphiques 3 à 5 montrent le positionnement stratégique en intelligence artificielle de la France, de l'Allemagne, de l'Europe, de la Chine et des États-Unis sur l'ensemble de la période 1990-2017. Sur l'axe horizontal, chaque domaine (chaque technique IA, chaque fonction IA, chaque applications IA) est caractérisé par sa part de marché en brevets sur le marché mondial. Commune pour tous les pays, cette mesure saisit l'importance économique du domaine considéré. Par exemple dans le graphique 3, l'apprentissage automatique représente plus de 19 % des brevets caractérisés par technique IA. L'axe vertical indique la spécialisation relative NISR⁹ de chaque pays et est donc propre à chaque pays. Ainsi, un pays situé dans le quadrant nord-est exhibe une spécialisation importante dans un marché a priori majeur. Par exemple, dans le cadre de l'apprentissage automatique, les États-Unis affichent la spécialisation la plus forte, par opposition à la Chine qui semble délaissier cette technique IA. Aussi, un pays situé dans le quadrant nord-ouest exhibe une spécialisation importante dans un marché a priori mineur. Un pays situé dans la partie basse du graphique montre une absence de spécialisation dans le domaine considéré.

8. L'annexe 1 présente le détail de notre méthode, s'inspirant du rapport sur l'intelligence artificielle du World Intellectual Property Organization (WIPO, 2019).

9. Voir encadré.

Encadré. Définition des indicateurs de positionnement stratégique et de degré d'intégration

L'information contenue dans les brevets et leur déclinaison en techniques, fonctions et applications IA permet de caractériser les domaines de spécialisation des pays et le degré d'intégration de la chaîne de valeur de l'innovation en intelligence artificielle. Premièrement, en nous appuyant sur les divers domaines TFA, nous reprenons la mesure de la spécialisation par domaine (technique, fonctionnel ou d'application) suivante : en notant $B_{c,d}$ le nombre de brevets développés dans le pays de résidence de l'inventeur c dans le domaine d , l'indice de spécialisation relative est défini par :

$$ISR_{c,d} = \frac{B_{c,d} / \sum_d B_{c,d}}{\sum_c B_{c,d} / \sum_c \sum_d B_{c,d}}$$

Cet indice est le ratio de deux proportions. Le numérateur représente la part de brevets appartenant au domaine d dans le pays c . Le dénominateur n'est autre que cette même proportion (la part des brevets appartenant au domaine d) dans l'ensemble des pays. Nous normalisons ensuite cet indicateur de façon à ce qu'il appartienne à l'intervalle $[0 ; +2]$ comme suit :

$$NISR_{c,d} = \frac{(ISR_{c,d} - 1)}{(ISR_{c,d} + 1)} + 1$$

L'indice $NISR_{c,d}$ garde l'unité comme valeur pivot. Il peut s'appliquer à chacun des domaines TFA individuellement.

Deuxièmement, le fait qu'un pays se spécialise dans plusieurs techniques, fonctions et applications IA pose la question de la cohérence des spécialisations le long de la chaîne de valeur en intelligence artificielle. Par exemple, les applications médicales s'appuient essentiellement sur la segmentation d'images et de vidéos et, dans une moindre mesure, des méthodes de contrôle et de la vision par ordinateur (fonctions). Or, la segmentation d'images et de vidéos repose dans une large mesure sur des techniques d'apprentissage non-supervisé et de logique floue. Ainsi une chaîne de valeur cohérente d'un pays spécialisé dans les applications médicales suggère une spécialisation dans les fonctions et techniques pertinentes. Le degré d'intégration est un indicateur de complémentarité de la chaîne de l'innovation et évalue les

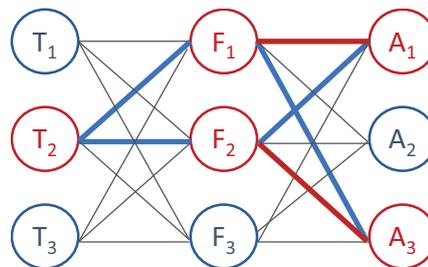
capacités d'un pays à créer et à tirer profit de la valeur produite à partir de ses domaines de spécialisation. Nous mesurons le degré d'intégration par l'expression :

$$DI = \sum_T \sum_F \sum_A ((\chi_{TF} + \chi_{FA}) \times (S_T \cdot S_F \cdot S_A))$$

où χ_{TF} est une mesure de la complémentarité entre des techniques et des fonctions, χ_{FA} est une mesure de la complémentarité entre des fonctions et des applications, et S est égale à 1 si le pays a un indice de spécialisation relative supérieur à 1, 0 sinon, dans la technologie t , la fonction f et l'application a . En outre, la mesure de complémentarité χ est calculée comme une distance du Chi-2. Pour la complémentarité entre techniques et fonctions, par exemple, $\chi_{tf} = (O_{tf} - T_{tf})/T_{tf}$ compare le nombre de brevets observés concernant à la fois une technique t et une fonction f avec effectifs théoriques T_{tf} établis sous hypothèse d'indépendance entre les techniques et les fonctions : $T_{tf} = P_{tf}/(P_t \times P_f)$, où P est la part dans l'ensemble des brevets.

Une valeur positive de χ_{TF} (respectivement de χ_{FA}) indique une attraction mutuelle entre une technique IA et une fonction IA (respectivement entre une fonction IA et une application IA), et une valeur négative suggère au contraire une exclusion mutuelle. L'indice de complémentarité χ est calculé au niveau mondial et s'applique à l'ensemble des pays de manière homogène.

Figure. Représentation de la chaîne de valeur de l'innovation IA pour un pays fictif



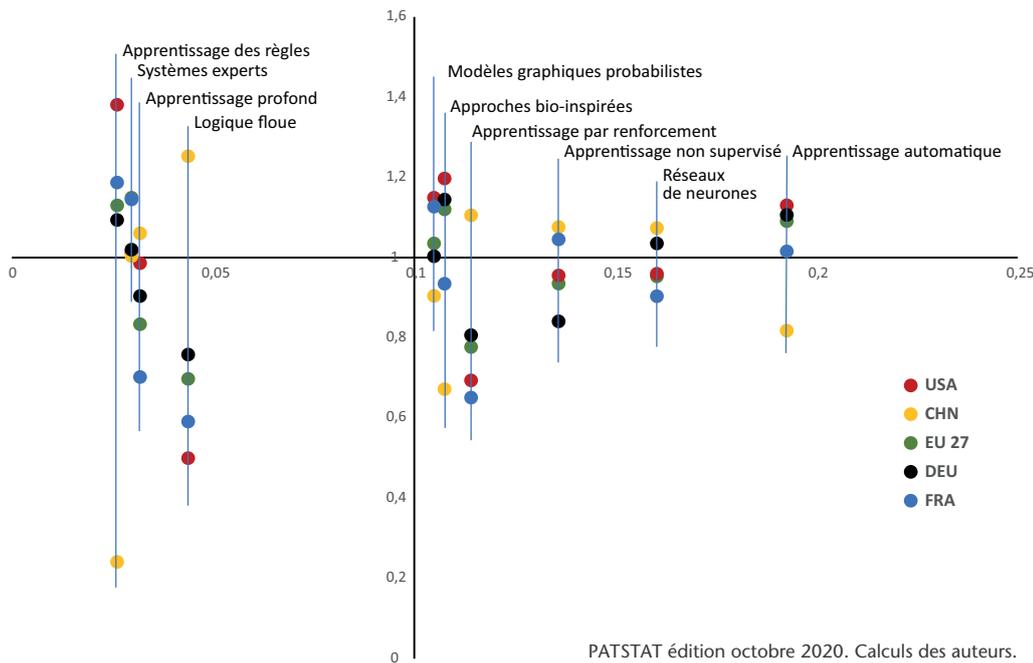
Pour mieux appréhender l'esprit de la mesure, la figure représente la chaîne de valeur de l'innovation IA avec trois techniques, trois fonctions et trois applications IA. Cela conduit à 27 chaînes Techniques-Fonctions-Applications possibles (dans ce travail, avec 10 techniques, 10 fonctions et 10 applications IA, le nombre total de chaînes possibles est de 1 000). Imaginons un pays quelconque spécialisé dans la technique T_2 , les fonctions F_1 et F_2 , et les applications A_1 et A_3 (i.e. $NISR > 1$, sommet en rouge dans le schéma) impliquant 4 chaînes de valeur possibles ($T_2-F_1-A_1$; $T_2-F_1-A_3$; $T_2-F_2-A_1$; $T_2-F_2-A_3$). Les arcs entre les sommets représentent le degré de complémentarité entre des techniques et des fonctions (χ_{TF}), puis des fonctions et des applications (χ_{FA}). Les arcs en gras représentent les complémentarités pertinentes pour ce pays, c'est-à-dire les complémentarités liant des domaines de spécialisation avérés. Dans le schéma, T_2 est positivement associé aux fonctions F_1 et F_2 (arcs bleus). On observe ensuite que la fonction F_1 est négativement associée à l'application A_1 (arc rouge), mais positivement associée à la fonction A_3 (arc bleu), à l'inverse de la fonction F_2 . Dans l'ensemble, le degré d'intégration est la somme des complémentarités observées (les arcs en gras) reliant les sommets correspondant à des spécialisations. Nous interprétons cette mesure comme indiquant la complémentarité entre les domaines TFA.

À titre d'exemple, la France montre une spécialisation dans les techniques « Systèmes Experts », d'« apprentissage automatique », de « modèles graphiques probabilistes », d'« apprentissage des règles » et d'« apprentissage non supervisé ». Elle est en outre spécialisée dans les fonctions de « vision par ordinateur », « méthode de contrôle », de « reconnaissance de caractères », de « segmentation d'images et de vidéos », et de « sémantiques ». Enfin, elle est spécialisée dans les applications relatives à la santé (« sciences médicales »), la « sécurité », et le domaine des « transports ». On observe, par exemple, que « l'apprentissage des règles », technique dans laquelle la France a un fort avantage comparatif, est fortement complémentaire avec la fonction « vision par ordinateur », fonction dans

laquelle la France a également développé un avantage comparatif ($\chi_{ARE-VO} = 7,01$). En revanche, « l'apprentissage des règles » est négativement lié à la « reconnaissance de caractères » ($\chi_{ARE-RC} = -0,68$), et à la « segmentation d'images et de vidéos » ($\chi_{ARE-SIV} = -0,98$). Au total pour le cas de la France, il y a 5 (techniques) \times 5 (fonctions) \times 3 (applications), soit 75 chaînes de valeur possibles. Le degré d'intégration n'est autre que la somme des degrés de complémentarités observées (entre les techniques et les fonctions, puis les entre les fonctions et les applications) le long de ces 75 chaînes possibles.

Concernant les techniques IA, la France compte 2 242 brevets en techniques IA, ce qui représente environ 1,9 % de la production mondiale. On retiendra que la France est présente sur trois marchés majeurs (l'apprentissage non supervisé, les modèles graphiques probabilistes et dans une moindre mesure l'apprentissage automatique), et sur deux marchés mineurs (les systèmes experts et l'apprentissage des règles). La France accuse un retard dans l'apprentissage flou, l'apprentissage profond, les réseaux de neurones mais aussi l'apprentissage par renforcement, des domaines qui constituent aujourd'hui le cœur de l'intelligence artificielle. L'Allemagne et les États-Unis ont des positionnements similaires. La Chine est spécialisée sur les techniques d'apprentissage (par renforcement, non supervisé, profond) et sur les domaines qui s'y rattachent (réseaux de neurones, logique floue).

Graphique 3. Positionnement stratégique des pays par technique IA



Axe horizontal : part de marché de la technique IA.

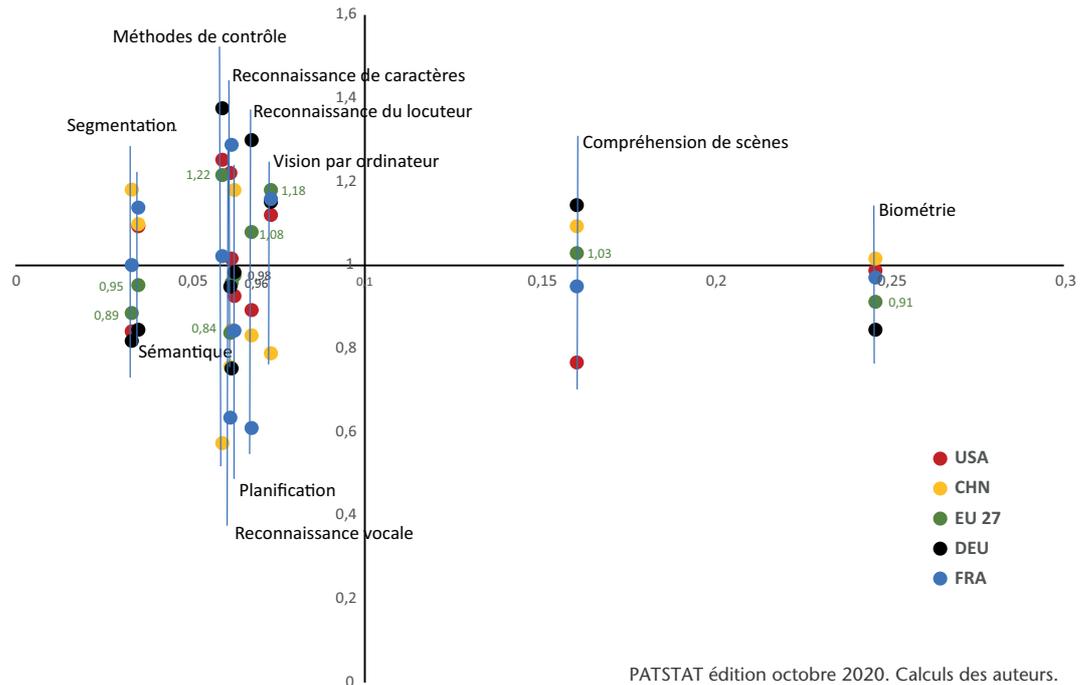
Axe vertical : indice de spécialisation des pays étudiés dans la technique IA (voir encadré).

Lecture : l'apprentissage automatique représente plus de 19 % des brevets caractérisés par technique. Avec un indice de spécialisation inférieur à l'unité, la Chine n'a pas de position dominante dans cette technique IA. Les États-Unis, l'Allemagne, l'Europe dans son ensemble, et la France dans une moindre mesure, affichent une spécialisation importante dans ce domaine.

Les fonctions IA sont dominées par la biométrie et les compréhensions de scènes. Lorsqu'on s'intéresse aux spécialisations relatives dans les différentes fonctions (graphique 4), la biométrie, source importante d'applications liées à la sécurité, aux transports et aux sciences médicales, exhibe des positionnements relatifs proches de

l'unité pour la France, la Chine et les États-Unis, avec un léger recul de l'Allemagne. Cette dernière affiche une spécialisation importante dans le domaine de la compréhension de scènes, une fonction essentielle de l'IA dans l'industrie manufacturière en général, et dans le secteur des transports en particulier. La France affiche une spécialisation importante dans les domaines de la reconnaissance de caractère (liée à la gestion de documents), de la vision par ordinateur (liés aux transports, à la sécurité, et aux sciences médicales), puis de la sémantique (fortement utilisée les activités des affaires, de l'éducation et de la bureautique).

Graphique 4. Positionnement stratégique des pays par fonction IA



PATSTAT édition octobre 2020. Calculs des auteurs.

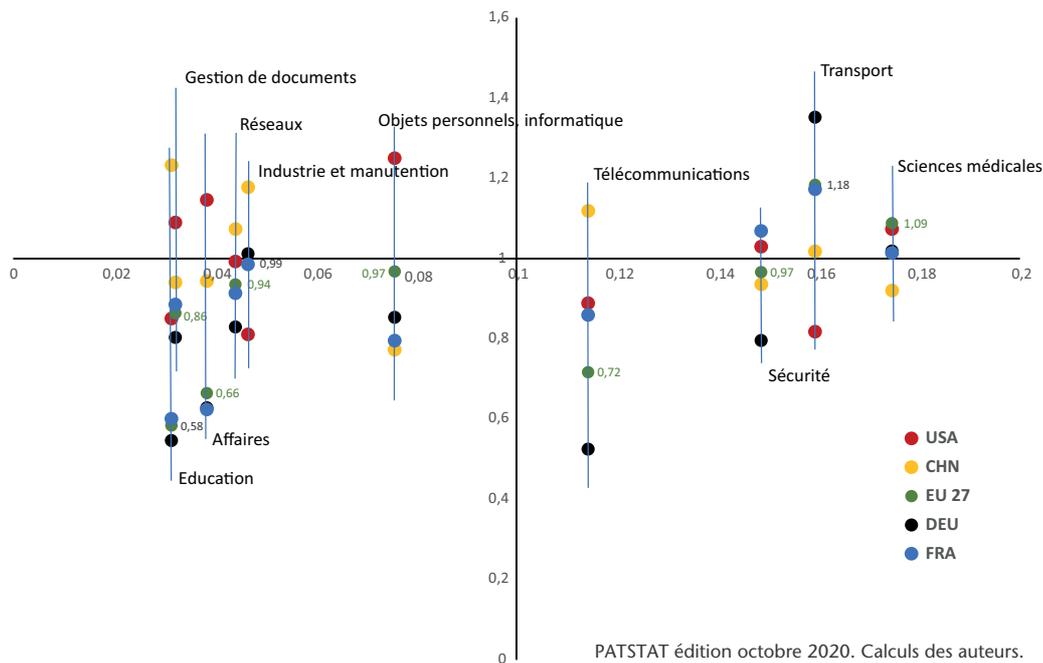
Axe horizontal : part de marché de la fonction IA.

Axe vertical : indice de spécialisation des pays étudiés dans la fonction IA (voir encadré).

Le graphique 5 s'intéresse aux applications. Il montre que les sciences médicales, les transports, la sécurité et les télécommunications sont des applications majeures de l'IA. La France affiche une spécialisation importante dans les transports (comme l'Allemagne) et la sécurité, la Chine dans les télécommunications et les États-Unis dans les sciences médicales. Dans les marchés *mineurs*, la Chine et les États-Unis montrent une forte domination, tant en termes de nombre de brevets que de spécialisation relative. C'est notamment le cas dans les applications liées aux objets personnels et à l'informatique, aux affaires et à la gestion de documents dominés essentiellement par les États-Unis, et à l'industrie, la manutention et à l'éducation pour la Chine. La France et l'Allemagne demeurent marginaux dans ces marchés mineurs.

Deuxième constat. *La France est spécialisée dans trois techniques d'IA majeures (en apprentissage automatique, en apprentissage non supervisé et en modèles graphiques probabilistes), et dans trois applications majeures (en sciences médicales, dans le domaine des transports et dans la sécurité). La France ne montre aucun avantage comparatif dans des fonctions IA majeures.*

Graphique 5. Positionnement stratégique des pays par application IA



Axe horizontal : part de marché de l'application IA.

Axe vertical : indice de spécialisation des pays étudiés dans l'application IA (voir encadré).

La chaîne de valeur en intelligence artificielle est-elle intégrée ?

La spécialisation des pays dans des techniques, fonctions et applications IA spécifiques pose la question de la cohérence des spécialisations le long de la chaîne de valeur en intelligence artificielle. La cohérence évalue le degré de complémentarité entre les différents niveaux de la chaîne de valeur et révèle la capacité de développement industriel à partir d'innovations conçues, développées et exploitées nationalement. Elle donne ainsi une indication des capacités à créer et à tirer profit de la valeur produite à partir des investissements domestiques. En faisant l'hypothèse d'une chaîne linéaire allant des techniques vers les fonctions, puis des fonctions vers les applications, on peut caractériser chaque pays selon le degré d'intégration de la chaîne de valeur IA. Un pays est d'autant plus intégré qu'il développe des compétences TFA complémentaires, c'est-à-dire que : (i) les techniques et les fonctions dans lesquelles le pays a un avantage comparatif sont complémentaires ; (ii) les fonctions et les applications dans lesquelles le pays a un avantage comparatif sont complémentaires. Il s'agit d'un indicateur sans dimension véritable et c'est par comparaison entre pays que nous pouvons tirer des conclusions¹⁰.

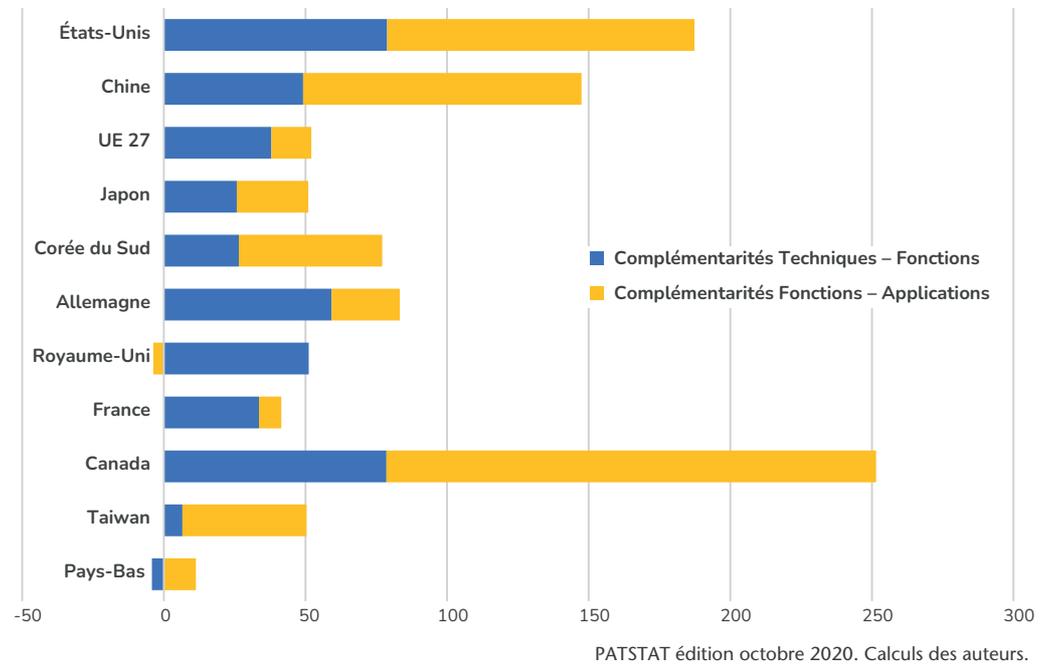
Le graphique 6 montre le degré d'intégration des principaux pays. Premièrement, les pays d'Amérique du Nord (les États-Unis et le Canada) sont très intégrés, suivis par la Chine. On ne peut s'étonner de la forte intégration des États-Unis et de la Chine. Représentant plus de 50 % des brevets, ce sont ces deux pays qui, pour l'essentiel, construisent et définissent les complémentarités entre les domaines TFA de l'IA. La position du Canada révèle que le profil TFA de ce pays est proche de celui des États-Unis. Les autres pays montrent des degrés d'intégration inférieurs. L'Allemagne et la Corée

10.

Voir l'encadré pour une présentation détaillée de la mesure.

du Sud ont un profil intégré relativement à la France et les Pays-Bas qui, eux, souffrent d'un manque de complémentarité de leurs savoir-faire en techniques, fonctions et applications IA.

Graphique 6. Degré d'intégration de la chaîne de valeur de l'IA, par pays



Le graphique 6 permet également de distinguer la contribution des complémentarités en amont, entre techniques et fonctions (en bleu), et des complémentarités en aval entre fonctions et applications (en orange). Encore un fois, l'Amérique du Nord et la Chine affichent une cohérence sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'innovation IA. L'Europe en général, et la France en particulier, ont une position médiane alors que les Pays-Bas et Taïwan ne sont pas intégrés. Dans une moindre mesure, la Corée du Sud et Taïwan montrent des complémentarités en aval substantielles. Le faible niveau d'intégration en aval est patent en Europe, et plus particulièrement en France. Les spécialisations ne semblent pas cohérentes aux Pays-Bas et au Royaume-Uni (sur les phases en aval)¹¹, augurant de difficultés futures quant à la valorisation économique de la chaîne de valeur.

11.

Ce constat implique trois situations possibles. La première, les investissements en IA sont réalisés dans des domaines absolument indépendants entre eux, menant à une intégration nulle. La deuxième, le pays est inséré dans la construction de complémentarités internationales, ce que la mesure ne peut saisir. Enfin, la troisième, la position du pays reflète une volonté nationale de se positionner de manière originale dans le paysage de l'IA, et les complémentarités restent encore à construire. Ces trois explications ne sont pas exclusives les unes des autres.

Troisième constat. La chaîne de valeur IA en France est moyennement, voir faiblement intégrée. Cela vient pour l'essentiel d'un manque d'intégration dans les phases en aval de la chaîne de valeur. L'Amérique du Nord et la Chine sont très intégrées, tant sur les phases en amont qu'en aval. L'Europe est plutôt intégrée sur les phases en amont de la chaîne de l'innovation IA alors que l'Asie montre une intégration en aval. L'Allemagne est le pays le plus intégré d'Europe, au contraire des Pays-Bas qui n'exhibent aucune intégration, donc une faible cohérence dans leur portefeuille de spécialisation.

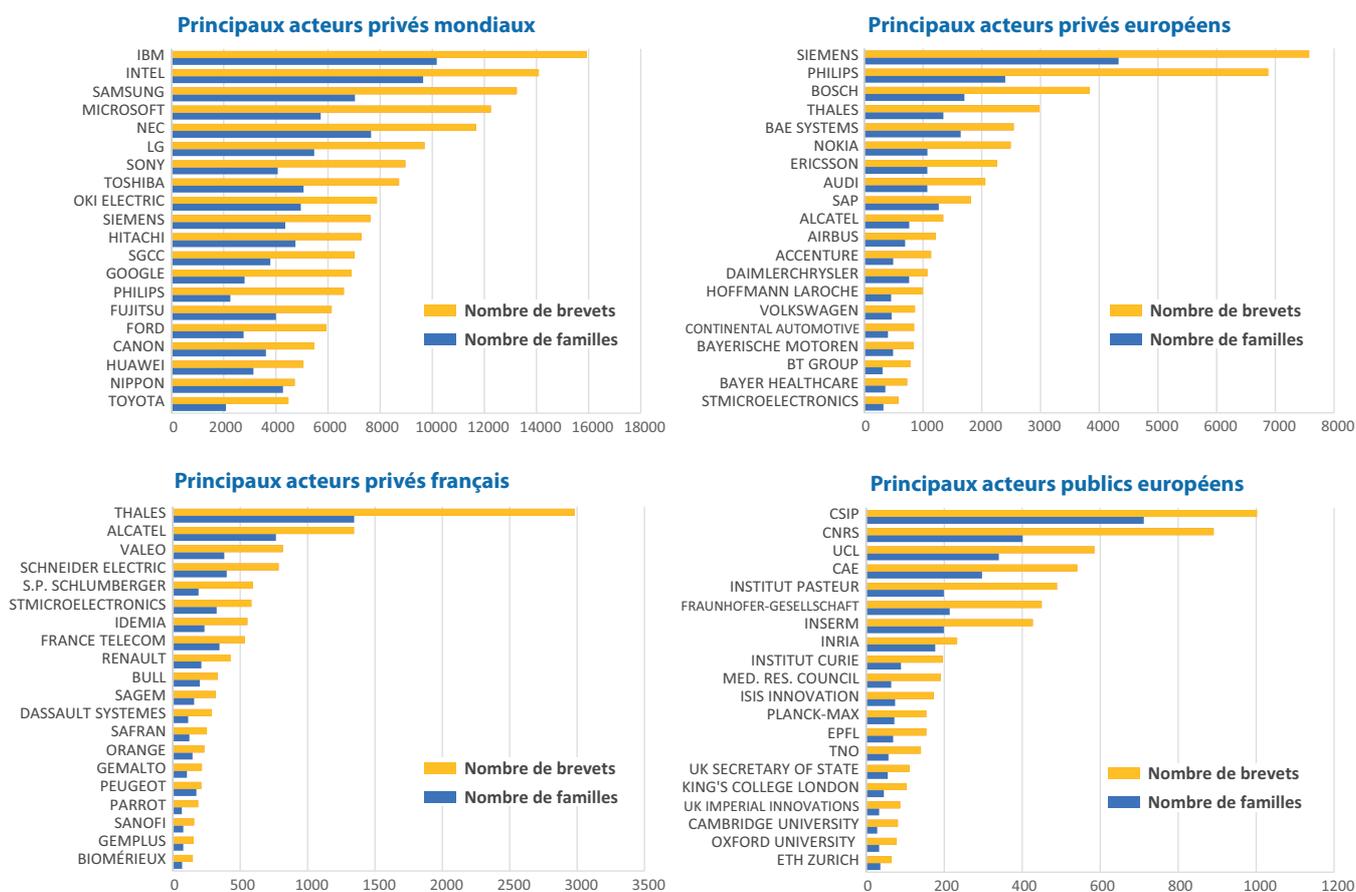
Qui sont les acteurs français et quelle est leur place dans le monde de l'IA ?

Nous nous concentrons maintenant sur les principales organisations, publiques et privées, qui soutiennent l'innovation en matière d'IA. Le graphique 7 présente les principales organisations privées et publiques productrices de brevets IA. Le quadrant nord-ouest présente les 20 principaux acteurs privés mondiaux, le quadrant nord-est les 20 principaux acteurs privés européens, le quadrant sud-ouest les 20 principaux acteurs privés français, le quadrant sud-est les 20 principaux acteurs publics européens.

Concernant les 20 acteurs privés mondiaux principaux (quadrant nord-ouest), le géant américain du matériel informatique IBM est leader avec environ 16 000 brevets qui correspondent à plus de 10 000 familles de brevets¹². Intel (États-Unis, 14 000 brevets), Samsung (Corée du Sud, 13 000 brevets), Microsoft (États-Unis, 12 000 brevets) et NEC (Japon, 11 000 brevets) sont les innovateurs majeurs de l'IA. Du point de vue de la nationalité des acteurs, le top 20 compte cinq entreprises américaines, deux coréennes (Samsung et LG Group), deux chinoises (SGDC – State Grid Corporation of China – et Huawei), une allemande (Siemens) et une néerlandaise (Philips). Les neuf acteurs restants sont japonais. Absente du top 20, la première entreprise française Thalès se classe en 37^e position avec environ 3 000 brevets recensés.

12. Le ratio entre nombre de brevets et le nombre de familles est une indication indirecte de la valeur économique des inventions (voir annexe).

Graphique 7. Les acteurs clefs dans le domaine de l'IA



PATSTAT édition octobre 2020. Calculs des auteurs.

Concernant les 20 principaux acteurs privés européens (quadrant nord-est), Siemens (Allemagne, 7 500 brevets), Philips (Pays-Bas, 6 900 brevets), Bosch (Allemagne, 4 000 brevets) constituent le trio de tête. Thalès est le quatrième acteur européen. Un regroupement par nationalité révèle la position dominante de l'Allemagne avec neuf entreprises dans ce top 20. On compte par ailleurs trois entreprises françaises (Thalès, Alcatel racheté par Nokia en 2015 et ST Microelectronics) et deux britanniques (BT Group et BAE Systems). En termes de secteurs d'activité, on constate la forte présence des constructeurs automobiles (Audi, Volkswagen, Daimler-Chrysler, Bayerische Motoren Werke BMW, Continental Automotive, Volkswagen). Sont aussi présents des groupes diversifiés comme Siemens (santé, industrie électronique et bâtiment), Bosch, spécialisé dans le bâtiment et l'automobile, SAP qui conçoit des logiciels, ou encore Bayer Healthcare, entreprise pharmaceutique et agrochimique.

Les deux quadrants du bas se concentrent sur les acteurs français et européens. Le quadrant sud-ouest recense les 20 premiers acteurs privés français. Derrière Thalès, on trouve Alcatel avec 1 300 brevets et Valeo avec 800 brevets. À l'échelle européenne, les leaders français montrent ainsi un retard important. Le quadrant sud-est présente les 20 premiers organismes de recherche publique en Europe. Avec 1 000 brevets, le CSIP espagnol (Consejo Superior de Investigaciones Cientificas) est en tête du classement. Les organismes de recherche français sont fortement représentés : le CNRS est 2^e avec 891 brevets, le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) et l'Institut Pasteur sont respectivement 4^e et 5^e, l'INSERM occupe la 7^e place, l'INRIA la 8^e et l'Institut Curie la 9^e place. On compte donc six institutions françaises parmi les dix principaux organismes de recherche européens.

En termes de qualité de brevets, les institutions françaises produisent des brevets à haute valeur économique. La taille moyenne des familles de brevets est de 2,2 pour le CNRS (versus 1,9 pour l'ensemble de ces institutions), de 2,5 pour l'Institut Pasteur, de 2,1 pour l'INSERM, de 2,2 pour l'Institut Curie. À l'opposé, la recherche publique britannique brevète peu ses avancées en IA. À l'exception de UCL, le Medical Research Council et les universités d'Oxford, de Cambridge, d'Imperial College, de King's College sont moins présentes en nombre de brevets. Une analyse plus fine montre toutefois que ces institutions déposent des brevets à haute valeur économique. La taille moyenne des familles est en effet de 3 pour le Medical Research Council, de 2,4 pour Oxford, de 2,9 pour Cambridge, de 2,6 pour Imperial College et de 2,3 pour King's College.

Quatrième constat. *La faible présence des acteurs privés français contraste avec la forte implication des acteurs publics français. La qualité des brevets IA des organismes de recherche français est remarquable. Les institutions françaises produisent donc des brevets à forte valeur économique.*

Quelle est la division du travail entre acteurs privés et acteurs publics ?

L'essor de l'IA remet en cause la distinction habituelle entre les sciences et les techniques. Tout d'abord, la distinction entre savoirs fondamentaux et appliqués devient équivoque. La plupart des connaissances fondamentales liées à l'IA, comme les algorithmes d'associations de type Deep Learning, favorise leur mobilisation dans des contextes très appliqués. À l'inverse la mise au point de techniques génériques impulse également une relation où la création de connaissances appliquées permet de repousser les frontières du savoir fondamental. Ceci remet en cause la distinction entre

acteurs publics en charge de la recherche fondamentale et les acteurs privés développant les savoirs appliqués.

Tableau 1. Nationalité et appartenance institutionnelle des acteurs impliqués dans les brevets (1990-2017)

	Privés	Publics	Privés / Publics
Monde	660 694	143 311	4,6
France	11 861	4 213	2,8
Allemagne	28 666	2 327	12,3
Chine	136 517	71 323	1,9
Corée du Sud	38 182	12 710	3,0
États-Unis	204 931	23 262	8,8
Japon	101 747	4 982	20,4
Royaume-Uni	9 956	1 954	5,1

PATSTAT édition octobre 2020. Calculs des auteurs.

En Chine, pour un brevet émanant d'une institution publique de recherche, on observe 1,9 brevet privé. Le nombre de pays concernés dans cette partie est restreint pour des raisons de qualité des données.

Nous comparons l'évolution des brevets déposés par les acteurs publics et par les acteurs privés. Comme le montre le tableau 1, le premier constat est que les entreprises privées produisent nettement plus de brevets que les institutions publiques. À un brevet public correspondent 4,6 brevets émanant d'acteurs privés, hors inventeurs individuels. On remarque, en outre, une grande hétérogénéité entre pays. Au Japon, par exemple, le ratio entre brevets privés et brevets publics est supérieur à 20, et s'élève à 12 en Allemagne. Ces ratios contrastent avec ceux observés pour la Chine, la France, et la Corée du Sud puisque dans ces pays, les organismes de recherche publique jouent un rôle moteur dans la génération de brevets IA. De toute évidence, ces chiffres révèlent des systèmes nationaux d'innovation radicalement différents entre pays.

Examinons maintenant les réseaux de collaborations en nous concentrant sur les co-brevets, c'est-à-dire les brevets appartenant à plusieurs organisations¹³. Le tableau 2 présente les principales caractéristiques des acteurs impliqués dans les co-brevets, selon leur nationalité et leur appartenance institutionnelle. Aussi les acteurs impliqués dans un co-brevet peuvent être de même nationalité ou de nationalité différentes, peuvent travailler dans des entreprises privées exclusivement, des institutions publiques exclusivement, ou révéler une collaboration public-privé. Cette décomposition est opérée pour l'ensemble des co-brevets observés dans le monde, et pour chacun des pays clés (France, Allemagne, Chine, Corée du Sud, États-Unis, Japon).

Dans l'ensemble, il n'est pas surprenant de constater que les co-brevets concernent essentiellement les acteurs privés (plus de 7000 co-brevets entre acteurs privés. Nous comptons moins de 1 000 co-brevets entre acteurs publics, et environ 2 000 co-brevets mixtes, *i.e.* entre acteurs publics et privés). La grande majorité des collaborations sont intra-nationales (presque 90 %), seulement un co-brevet sur 10 rassemble des acteurs de nationalités différentes. Il est intéressant de constater que globalement (au niveau mondial), les entreprises privilégient les collaborations intra-nationales alors que les collaborations impliquant au moins un acteur public sont davantage tournées vers l'international.

13.

Dans la base de 860 000 brevets IA, nous comptons une minorité de co-brevets, environ 40 000. Par ailleurs, nous ne retenons que les acteurs ayant au minimum 50 co-brevets afin de simplifier le paysage des acteurs les plus impliqués dans les collaborations. Cela représente, au final, un peu plus de 10 000 co-brevets pour 166 acteurs. Ces 166 acteurs établissent 572 liens entre eux, sur les 13 695 liens potentiels ($166 \times 165 \div 2$). Chaque lien peut correspondre à plusieurs co-brevets. Chacun de ces co-brevets est ensuite caractérisé par la nationalité des acteurs impliqués et par leur nature publique ou privée.

Tableau 2. Nationalité et appartenance institutionnelle des acteurs impliqués dans les co-brevets

Type d'acteurs	Collaborations nationales			Collaborations internationales			% I	% M
	Privés	Mixtes	Publics	Privés	Mixtes	Publics		
Monde	6 233	1 784	848	773	343	127	12,3	21,0
France	0	22	386	65	40	38	26,0	11,3
Allemagne	151	0	0	79	75	0	50,5	24,6
Chine	4 260	992	91	492	83	7	9,8	18,1
Corée du sud	553	391	42	35	34	32	9,3	39,1
États-Unis	209	254	286	130	233	115	39,0	39,7
Japon	807	125	3	199	106	1	24,7	18,6

PATSTAT édition octobre 2020. Calculs des auteurs.

Le nombre observé de co-brevets entre deux acteurs privés de même nationalité, dans le monde, s'élève à 6 233.

% I : pourcentage de collaborations internationales.

% M : pourcentage de collaborations mixtes, c'est-à-dire entre acteurs privés et publics.

Le nombre de pays concernés dans cette partie est restreint pour des raisons de qualité des données.

La position de la France est singulière. On remarque en effet l'absence de collaboration intra-nationale entre acteurs privés. Toutes les collaborations privées en France impliquent un acteur étranger. En revanche, on observe un fort niveau de collaboration entre les diverses institutions de recherche publiques françaises (386 co-brevets), et peu s'ouvrent à l'international (38 seulement). La faiblesse des acteurs privés français dans les co-brevets contraste avec leur forte ouverture internationale, puisque presque tous impliquent une collaboration internationale. Dans l'ensemble, en France, les principaux acteurs des collaborations en innovation IA formalisées par un co-brevet sont des acteurs publics. Les réseaux de collaborations de l'Allemagne montrent une impulsion contraire à celle de la France. Les brevets entre acteurs allemands sont exclusivement portés par des acteurs privés. Les institutions publiques de recherche impliquées dans des co-brevets allemands sont, elles, situées à l'étranger. En volume, les réseaux allemands semblent en retrait par rapport au volume des brevets. Toutefois quand des acteurs allemands sont impliqués dans un co-brevet, ils font preuve d'une plus grande ouverture à l'internationale.

Relativement à leur production de brevets, les États-Unis montrent un très faible niveau de collaboration. Toutefois, comme dans le cas de l'Allemagne, quand des acteurs américains sont impliqués dans un co-brevet, ce co-brevet implique souvent un acteur étranger. La Chine, la Corée du Sud et le Japon se conforment globalement aux faits stylisés observés au niveau mondial. Dans ces pays, les collaborations sont impulsées par les acteurs privés, avec une forte dominante des collaborations intra-nationales.

Cinquième constat. *Au niveau national, la France se distingue par une forte présence de sa recherche publique dans la production d'innovation incorporant de l'IA. Elle s'oppose, sur cette dimension, au Japon et à l'Allemagne et est comparable à la Chine et à la Corée du Sud. En termes de collaborations, les réseaux français de co-brevets sont portés par les acteurs publics. Ils sont essentiellement intra-nationaux et sont faiblement ouverts à l'international et à la mixité institutionnelle, à la différence des co-brevets des acteurs privés.*

Conclusion

Les points à retenir sont les suivants :

1. Avec une part de marché s'élevant à 2,4% des brevets IA, la France se situe au septième rang mondial. Normalisée par le nombre d'habitants, la France se situe au 15^e rang mondial, avec 312 brevets par million d'habitants. Dans l'ensemble, sans être un leader mondial de l'innovation incorporant de l'intelligence artificielle, la France est un acteur significatif ;
2. La France est spécialisée dans trois techniques IA majeures (apprentissage automatique, apprentissage non supervisé et modèles graphiques probabilistes), et dans trois applications majeures (sciences médicales, les transports et la sécurité). La France ne montre aucun avantage comparatif dans des fonctions IA majeures ;
3. La chaîne de valeur IA en France est moyennement, voir faiblement intégrée. Cela vient pour l'essentiel d'un manque d'intégration dans les phases en aval de la chaîne de valeur. L'Amérique du Nord et la Chine sont très intégrées, tant sur les phases en amont qu'en aval. L'Europe est plutôt intégrée sur les phases en amont de la chaîne de l'innovation IA alors que l'Asie montre une intégration en aval. L'Allemagne est le pays le plus intégré d'Europe, au contraire des Pays-Bas qui n'exhibent aucune intégration, donc une faible cohérence dans leur portefeuille de spécialisation ;
4. La faible présence des acteurs privés français dans l'échelle mondiale contraste avec la forte implication des acteurs publics français. La qualité des brevets IA des organismes de recherche français est remarquable. Les institutions françaises produisent donc des brevets à forte valeur économique ;
5. Au niveau national, la France se distingue par une forte présence de sa recherche publique dans la production d'innovation incorporant de l'IA. Elle s'oppose, sur cette dimension, au Japon et à l'Allemagne et est comparable à la Chine et à la Corée du Sud. En termes de collaborations, les réseaux français de co-brevets sont portés par les acteurs publics mais ceux-ci sont faiblement ouverts à l'international et à la mixité institutionnelle.

Il est délicat de se prononcer sur l'avenir de la France en matière d'IA. Au vu de la performance remarquable des institutions françaises de recherche publique, il n'y a pas lieu d'être pessimiste. La base scientifique est avérée, et, dans la mesure où l'IA est un domaine basé sur la science, ce prérequis peut être considéré comme étant satisfait. Mais pour nécessaire qu'elle soit, cette condition ne saurait suffire. L'absence des grands groupes français dans les réseaux d'innovation, de même que leur retard relativement aux acteurs majeurs mondiaux, nous interrogent. La France court le risque de devenir un laboratoire mondial de l'IA, située en amont des activités d'innovation proprement dites, supportant les coûts fixes et irrécouvrables liés à chaque microprojet, sans trouver le relais nécessaire, au niveau national à tout le moins, quant à leur exploitation à plus grande échelle. En bref, notre crainte est que l'intelligence artificielle *made in France* se trouve à terme sans débouché national et devienne un exportateur technologique sans permettre la réalisation des économies d'échelle sous-jacentes au niveau local.

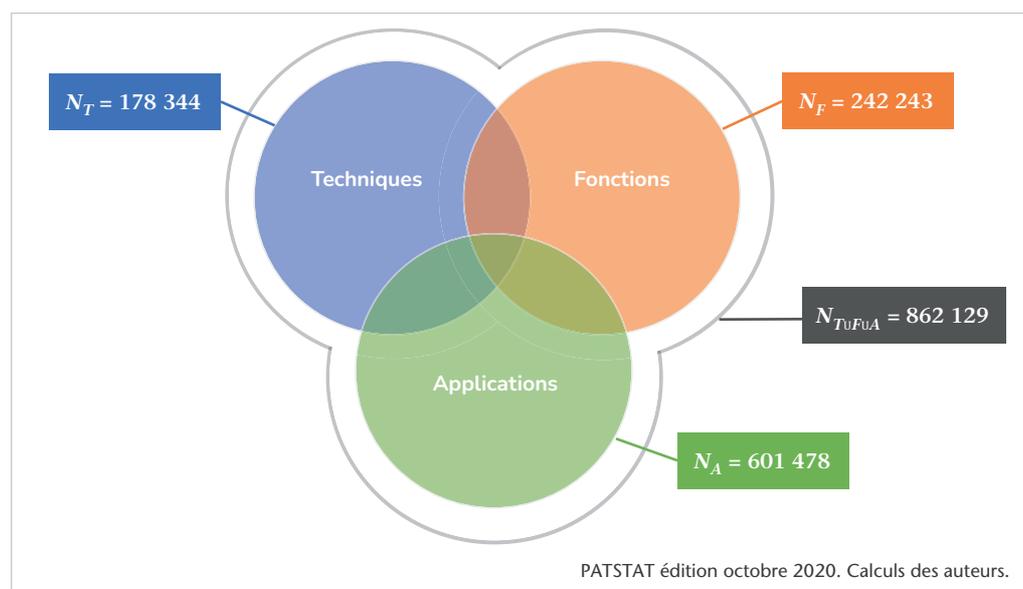
Références

- Acemoglu D. & Restrepo P., 2019, « Automation and new tasks: How technology displaces and reinstates labor », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 33, n° 2, pp. 3-30.
- Aghion P., Antonin C. & Bunel S., 2019, « Artificial intelligence, growth and employment: The role of policy », *Economie et Statistique*, n° 510(1), pp. 149-164.
- Agrawal A., Gans J. S. & Goldfarb A., 2019, « Artificial intelligence: the ambiguous labor market impact of automating prediction », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 33, n° 2, pp. 31-50.
- Babina T., Fedyk A., He A. X. & Hodson J., 2021, « Artificial Intelligence, Firm Growth, and Product Innovation », *Firm Growth, and Product Innovation*, novembre.
- Bresnahan T. F. & Trajtenberg M., 1995, « General purpose technologies 'Engines of growth?' », *Journal of econometrics*, vol. 65, n° 1, pp. 83-108.
- Cockburn I. M., Henderson R. & Stern S., 2019, « 4. The Impact of Artificial Intelligence on Innovation: An Exploratory analysis », In *The Economics of Artificial Intelligence* (pp. 115-148). University of Chicago Press.
- McKinsey Global Institute, 2018, « Notes from the AI frontier: Modeling the Impact of AI on the World Economy », *McKinsey Global Institute*, rapport n° 4.
- OCDE, 2019, *L'intelligence artificielle dans la société?*, Paris, OCDE.
- OECD, 2020, *Identifying and Measuring Developments in Artificial Intelligence: Making the Impossible Possible*, Paris, OCDE.
- SKEMA Business School, 2022, *Intelligence artificielle : technologies et acteurs clés*, Rapport annuel, édition 2022, SKEMA Business School, OTESIA-Université Côte d'Azur.
- Varian H., 2018, « Artificial intelligence, economics, and industrial organization » in *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*, University of Chicago Press, pp. 399-419.
- WIPO, 2019, *Technology Trends: Artificial Intelligence*, WIPO Annual Report.

ANNEXE 1. Les brevets IA comme matériau de base

Pour décrire la dynamique de l'IA, nous mobilisons des données de brevet. En développant des indicateurs statistiques de brevets, ce rapport propose une lecture partielle de l'innovation en IA. En tant qu'algorithme, l'IA ne se prête pas au brevetage (article 52 de la Convention sur le brevet européen, 16^e édition, 2020), et ce n'est qu'intégrée dans une technologie matérialisée que celle-ci peut être brevetée. Toutefois, l'usage du brevet a deux avantages essentiels. Premièrement, le brevet constitue une source de données à la fois rare, unique et systématique quant à la richesse des informations qu'il contient : son contenu technologique, le nom et la localisation de l'inventeur et de son propriétaire, l'année de priorité, le titre du brevet et son résumé. L'information relative aux publications scientifiques mentionnées dans les brevets représente une opportunité pour établir un lien entre le monde technologique représenté dans les brevets et le monde scientifique. Deuxièmement, le brevet nous permet de saisir les activités d'innovation qui impliquent l'intelligence artificielle et l'associent à des marchés pressentis comme porteurs. Ce faisant, on se concentre sur le développement marchand de l'IA, c'est-à-dire incorporé en valeur ajoutée, davantage que sur le développement scientifique et technique de l'IA.

Figure A1. Nombre de brevets IA identifiés, selon le modèle TFA



La lettre N signifie le nombre de brevets IA identifiés. Les intersections des ensembles sont les suivantes : $N_{TF} = 40\,973$; $N_{TnA} = 45\,679$; $N_{FuA} = 862\,129$; $N_{TnFA} = 19\,705$.

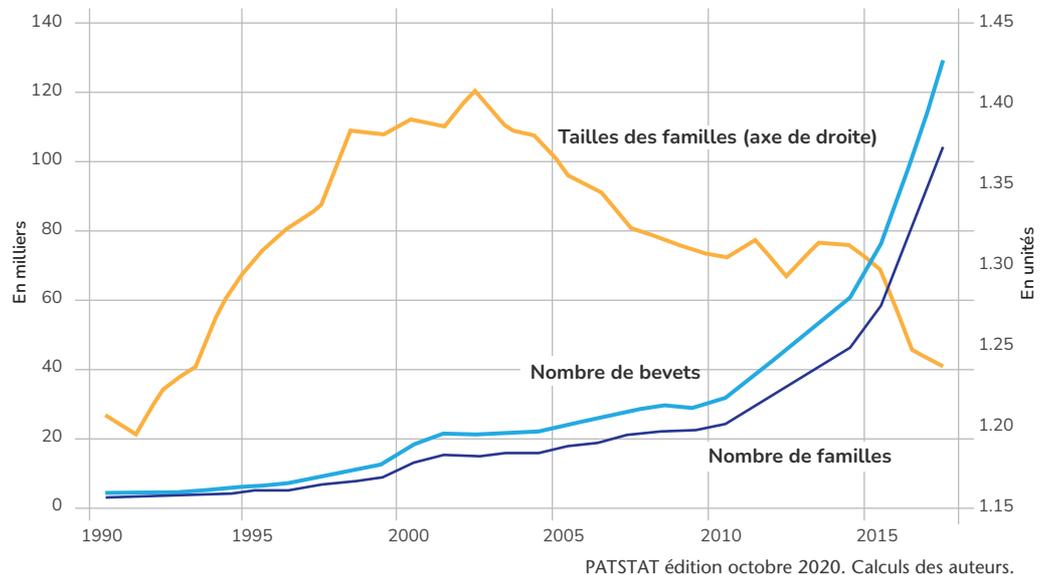
Notre source d'information est PATSTAT. PATSTAT est une base de données recensant systématiquement les demandes de brevet et contient ainsi des données bibliographiques sur plus de 100 millions de documents brevets provenant de grands pays industrialisés et en développement. Le caractère systématique du recensement la rend très attractive bien qu'elle ne soit pas exhaustive, ni géographiquement ni temporellement. Toutefois, les principaux offices de propriété intellectuelle constituent une partie structurelle de la base. Un facteur très attractif de PATSTAT est l'organisation de l'information en tables relationnelles qui rend son usage très intuitif. Nous nous inspirons de la méthode du bureau international des brevets (WIPO) et de son rapport « WIPO Technological Trends 2019 – Artificial Intelligence »¹. Cette classification reprend les trois principales catégories d'IA du triptyque Techniques-Fonctions-Applications :

1. World Intellectual Property Organization: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4386>

1. Les techniques : ce sont des formes avancées de modèles statistiques et mathématiques permettant les calculs des tâches généralement effectués par les humains ;
2. Les fonctions : ce sont les fonctions qui peuvent être réalisées en utilisant une ou plusieurs techniques IA ;
3. Les domaines d'application : ce sont les différents domaines d'application où l'IA est appliquée, comme par exemple les transports, l'agriculture ou les sciences médicales.

L'identification d'un brevet IA, et sa classification en techniques, fonctions et domaines d'application s'effectue par la recherche de mots clés et de classes technologiques. Un brevet peut être à la fois une technique, une fonction et une application, de même qu'il peut se cantonner à n'être qu'une technique, qu'une fonction, ou encore qu'une application (figure A1).

Graphique A1. Évolution du nombre de demandes de brevets en intelligence artificielle, de familles de brevets et taille moyenne des familles, entre 1990 et 2017



Le graphique A1 présente l'évolution du nombre de brevets identifiés comme relevant de l'IA et déposés entre 1990 et 2017. Le nombre de brevets croît significativement sur la période, à l'exception du début des années 2000. Après 2010, nous observons une accélération impressionnante du nombre de demandes de brevets sur la période jusqu'à atteindre 140 000 en 2017. Nous pourrions être tentés d'attribuer cette forte croissance à l'avènement du Deep Learning du début des années 2010, ce dernier constituant une véritable rupture dans le développement de l'IA. Nous restons pourtant prudents quant à cette explication, observant cette non-linéarité sur l'ensemble des demandes de brevets. Enfin, la courbe en trait discontinu montre l'évolution de la taille moyenne de la famille. Nous observons un grand cycle conforme au cycle général. Nous conjecturons toutefois que ce cycle va se retourner avec le développement de l'IA.

Dans l'ensemble, notre méthode d'identification des brevets IA permet d'obtenir un ensemble que nous pouvons considérer comme notre base de brevets en relation avec l'IA sur la période 1990-2017. Au total, entre 1990 et 2017, il y a plus de 860 000

brevets en relation avec l'IA. Parmi eux, environ 178 000 brevets sont liés à des techniques IA, environ 242 000 à des fonctions IA et plus de 600 000 à des applications IA.

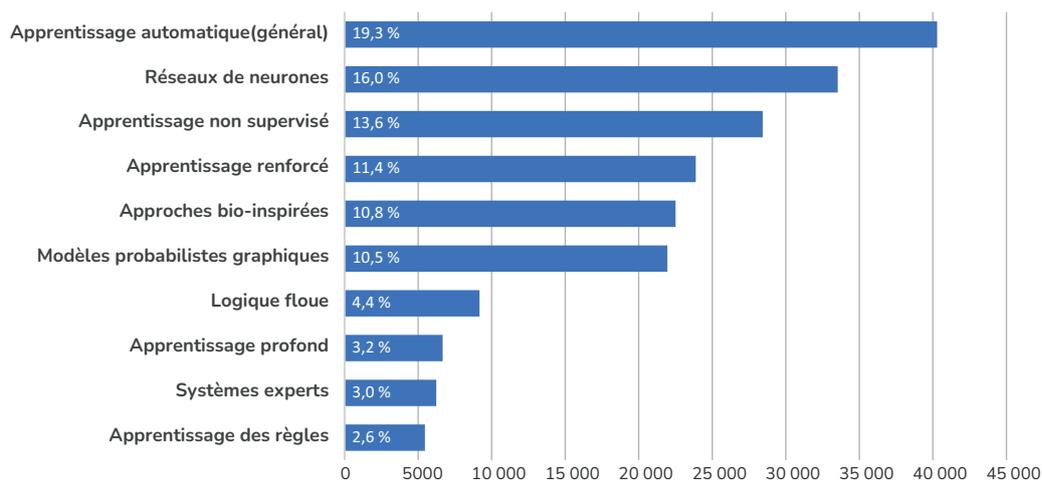
Il y a deux façons de comptabiliser l'activité d'invention donnant lieu à des demandes de propriété intellectuelle. Premièrement, on peut comptabiliser le nombre de familles. La famille de brevet est un terme générique dans PATSTAT qui identifie l'invention. Par exemple, une entreprise fictive française décide de protéger son invention auprès de l'Institut national de la propriété intellectuelle (INPI), puis décide d'étendre sa protection en Brésil, aux États-Unis, en Afrique du Sud et en Chine. Dans PATSTAT, cela se traduirait par quatre nouveaux brevets. Toutefois, ces brevets sont relatifs à une seule et même invention, autrement dit, une seule et même famille. Deuxièmement, on peut comptabiliser le nombre de brevets. Une autre interprétation du comptage de brevet est qu'il s'agit du nombre de familles, chaque famille étant pondérée par le nombre de brevets. Sachant qu'une invention est d'autant plus importante qu'elle est protégée dans un nombre important de pays, on peut interpréter le nombre de brevets par famille comme définissant la valeur économique d'une invention. Dans ce travail, la taille moyenne d'une famille de brevets IA est de 1,3 brevet.

Sur les 860 000 brevets IA, 178 344 brevets sont associés à au moins une technique IA appartenant à 124 675 familles de brevets entre 1990 et 2017. Les dix premières techniques sont (par fréquence décroissante, voir graphique A2) : l'apprentissage automatique (19,3 %), les réseaux de neurones (16 %), l'apprentissage non supervisé (13,6 %), l'apprentissage renforcé (11,4 %), les approches bio-inspirées (10,8 %), les modèles probabilistes graphiques (10,5 %), la logique floue (4,4 %), l'apprentissage profond (3,2 %), les systèmes experts (3,0 %), l'apprentissage des règles (2,6 %). Ces 10 premières techniques IA couvrent ainsi plus de 95 % des occurrences des techniques IA.

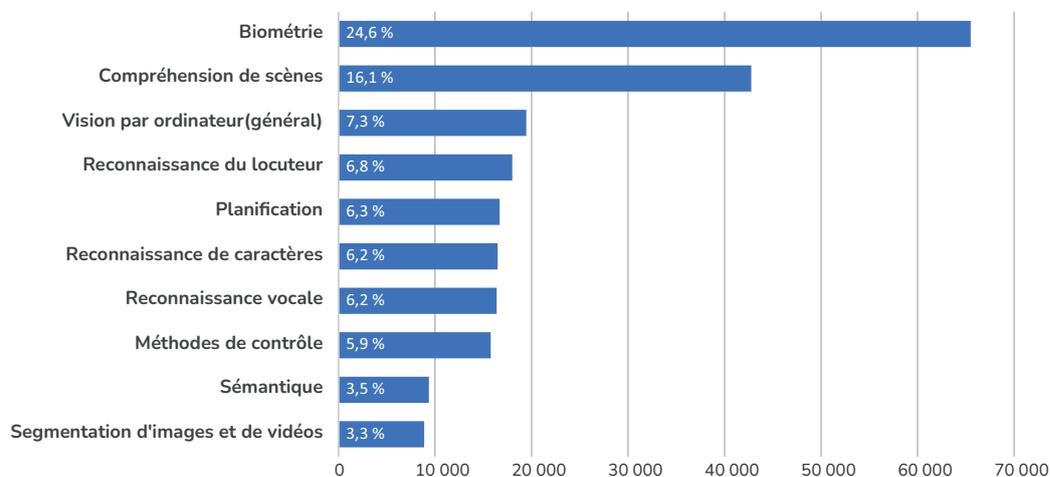
On compte 242 243 brevets appartenant à 154 856 familles de brevets associées des fonctions IA. Les dix premières fonctions sont (par fréquence décroissante, voir graphique A3) : la biométrie (24,6 %), la compréhension des scènes (16,1%), la vision par ordinateur (7,4 %), la reconnaissance du locuteur (6,8 %), la planification (6,3 %), la reconnaissance de caractères (6,2 %), la reconnaissance vocale (6,2 %), les méthodes de contrôles (5,9 %), la sémantique (3,5 %), la segmentation d'images et de vidéos (3,3 %). Ces 10 premières fonctions IA couvrent ainsi plus de 86 % des occurrences des fonctions IA.

Le nombre de brevets d'application excède largement le nombre de brevets associés à des techniques ou des fonctions. Cela semble cohérent avec l'hypothèse considérant l'IA comme une GPT : un nombre limité de techniques et de fonctions contribue au développement d'un nombre important (et croissant) d'applications. Ainsi, entre 1990 et 2017, on recense 601 478 brevets uniques qui font référence à un ou plusieurs domaines d'applications. Les dix premiers domaines d'application sont (par fréquence décroissante, voir graphique A4) : les sciences médicales (17,5 %), les transports (15,9 %), la sécurité (14,9 %), les télécommunications (11,4 %), objets personnels et informatique (7,8 %), l'industrie et la manutention (4,8 %), les industries de réseaux (4,4 %), le milieu des affaires (3,8 %), la gestion de documents (3,2 %), le secteur de l'éducation (3,1 %). Ces 10 premiers domaines d'application couvrent ainsi plus de 85 % des occurrences en applications IA. ■

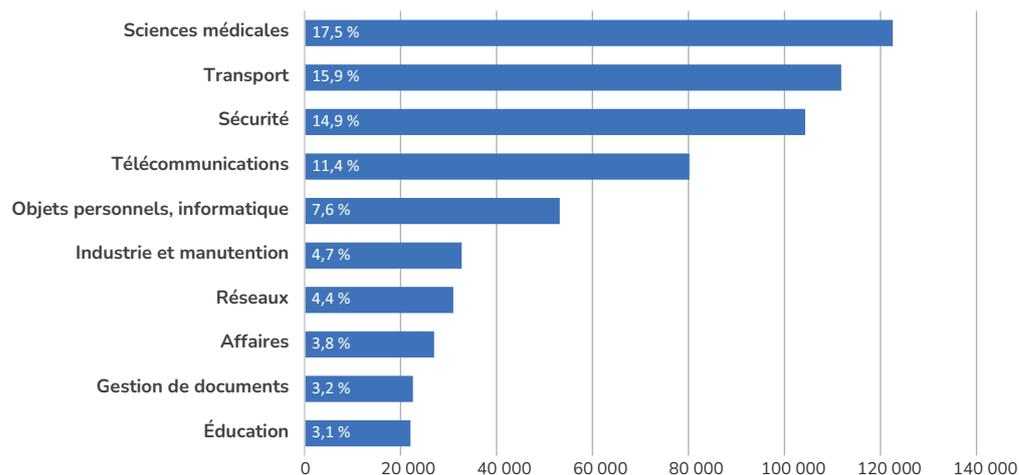
Graphique A2. Fréquence relatives des dix techniques IA principales révélées dans les brevets IA



Graphique A3. Fréquence relatives des dix fonctions IA principales révélées dans les brevets IA



Graphique A4. Fréquence relatives des dix applications IA principales révélées dans les brevets IA



PATSTAT édition octobre 2020. Calculs des auteurs.