



The Acceleration of Innovation: A Quantitative Study of Technological Progress and its Societal Constraints

L'Accélération de l'Innovation : Une Étude Quantitative du Progrès Technologique et de ses Contraintes Sociétales

Dr. Clercy NTSAY

École Doctorale Thématique GENESIS
Université d'Antsiranana
Antsiranana – Madagascar

Pr. Odilon TIANKAVANA

École Doctorale Thématique GENESIS
Université d'Antsiranana
Antsiranana – Madagascar

Résumé : Le sentiment d'une accélération technologique générale est-il quantifiable ? Nous reconstruisons la chronologie de cinq technologies à usage général, de l'imprimerie à Internet, et modélisons les intervalles entre leurs adoptions de masse par une décroissance géométrique bornée par un seuil minimal, que nous appelons plancher d'adaptation. L'estimation par moindres carrés non linéaires et bootstrap donne un facteur de décroissance de 0,344 : chaque intervalle vaut environ un tiers du précédent. Le plancher, estimé à 10 ans, ne se distingue pas statistiquement de zéro sur ces quatre observations macro-historiques, mais l'examen des micro-intervalles internes à la vague Internet fait apparaître un palier de l'ordre de cinq ans. Projeté, le modèle situe la bascule suivante autour de 2009, ce qui conduit à examiner les candidats déjà présents. Soumises à un test en six critères inspiré des travaux sur les technologies à usage général, l'intelligence artificielle satisfait l'ensemble des critères et la blockchain seulement une partie, ce qui la classe comme grappe et non comme socle. Le socle suivant est attendu autour de 2029.

Abstract: Is the perceived acceleration of technological change measurable? We reconstruct the timeline of five general purpose technologies, from the printing press to the Internet, and model the intervals between their mass adoptions as a geometric decay bounded by a minimum threshold, which we call the adaptation floor. Non-linear least squares estimation with bootstrap resampling yields a decay factor of 0.344: each interval is roughly one third of the previous one. The floor, estimated at 10 years, is not statistically distinguishable from zero on four macro-historical observations, yet micro-intervals within the Internet wave reveal a plateau of about five years. Projected forward, the model places the next transition around 2009, which leads us to assess the candidates already present. Tested against six criteria derived from the general purpose technology literature, artificial intelligence meets all of them while blockchain meets only some, which places it as a cluster rather than a base. The following base is expected around 2029.

Mots-clés : accélération technologique ; technologies à usage général ; plancher d'adaptation ; socle technologique ; intelligence artificielle ; blockchain.

Keywords: technological acceleration ; general purpose technologies ; adaptation floor ; technological base ; artificial intelligence ; blockchain.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22644968>

Introduction : Une course folle ressentie par chacun

Nous rappelle-t-on notre première expérience sur Internet ? Ou de notre premier téléphone intelligent ? Ces instants paraissent à la fois très proches et déjà éloignés. C'est précisément ce sentiment dérangentant qui nous a incités à examiner une question qui préoccupe notre époque : est-ce que tout s'accélère réellement par rapport au passé ?

Depuis la révolution de l'imprimerie de Gutenberg au XV^e siècle, qui a radicalement changé le paysage de son époque, jusqu'à la dernière innovation en date qu'est l'intelligence artificielle qui remet actuellement en question nos certitudes, l'humanité n'a pas arrêté de connaître des révolutions technologiques. Ces « technologies à usage général », que les économistes désignent sous le terme de GPT (pour Technologies à Usage Général), ne se limitent pas à perfectionner ce qui est déjà en place. Non, elles modifient tout : nos méthodes de travail, nos modes de communication, notre manière de cohabiter.

Lorsque nous observons la machine à vapeur, l'électricité, l'informatique..., chacune de ces vagues a totalement redéfini l'ordre établi, que Joseph Schumpeter lui-même qualifie ces innovations de « destruction créatrice »¹. Du passé qui s'estompe, du nouveau qui se révèle, parfois avec peine mais aussi fréquemment dans l'émerveillement.

Se pose toutefois une question : avons-nous réellement le sentiment que tout cela s'accélère ? La blockchain, l'IA générative, les smartphones, Internet... Tout paraît s'agiter, nous laissant parfois sans voix. Est-ce que ce sentiment d'accélération continue, voire exponentielle, se traduit par une réalité quantifiable ? Et si c'était le cas, jusqu'où cette course effrénée peut-elle nous mener ?

L'idée de comprendre tout ceci est l'objet précisément de notre recherche. En examinant attentivement cinq grandes révolutions technologiques, à savoir l'imprimerie, la vapeur, l'électricité, l'informatique et Internet, nous avons tenté d'évaluer ce concept de progrès rapide. Nous avons l'intuition que cette accélération est réelle et qu'elle n'est pas sans limite. Elle est confrontée à un aspect essentiel : le temps que nous, êtres humains, nécessitons pour assimiler, comprendre et véritablement intégrer ces transformations profondes. Nous désignons cette limite comme le « seuil d'adaptation sociétale ».

En d'autres termes, bien que notre potentiel d'innovation paraisse infini, notre aptitude collective à nous adapter, elle, est limitée. Cette dynamique captivante entre l'innovation fait progresser rapidement et l'adaptation qui suit tant bien que mal est l'objet de notre analyse.

1. Comment saisir ces vagues de changements ?

Pour bien comprendre et saisir l'idée d'accélération, il est essentiel de d'abord se pencher sur la manière dont les économistes et les sociologues la perçoivent. Cela fait près de cent ans qu'on discute sérieusement de la notion que le progrès technologique ne suit pas une progression constante et linéaire, mais plutôt des phases intermittentes et successives.

1.1. De Kondratiev à Schumpeter : l'économie, un phénomène cyclique

Dans les années 1920, l'économiste russe Nikolaï Kondratiev avait fait une observation intéressante. D'après son analyse, l'économie globale traversait des cycles de longue durée, variant entre 40 et 60 ans². Le concept est que des agglomérations d'innovations technologiques émergent, stimulent les investissements et la croissance, puis s'épuisent progressivement jusqu'à ce qu'un nouveau cycle prenne le pas. C'est comme si l'économie inhalait de grandes bouffées de technologie.

¹J. A. Schumpeter, *Capitalism, Socialism and Democracy*, New York, Harper & Brothers, 1942.

²N. D. Kondratieff et W. F. Stolper, « The Long Waves in Economic Life », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 17, n° 6, 1935, p. 105-115.

Joseph Schumpeter a en effet légitimé cette perspective grâce à sa célèbre théorie de la « destruction créative »³. Selon lui, le capitalisme n'est rien d'autre qu'une « longue rivière tranquille ». C'est un système qui se transforme continuellement, non pas par une expansion douce et uniforme, mais par un processus ininterrompu de destruction-reconstruction. Les avancées radicales, impulsées par des entrepreneurs courageux, ne se limitent pas à perfectionner l'existant : elles le supplantent tout simplement. Chaque grande révolution technologique, comme la locomotive à vapeur, le chemin de fer ou l'électricité, fonctionne comme un moteur de destruction créatif qui bouleverse totalement les équilibres du pouvoir économique et social.

1.2. Technologies polyvalentes : ces avancées qui bouleversent tout

Plus récemment, des études menées par des chercheurs tels que Bresnahan et Trajtenberg ont perfectionné cette analyse en introduisant le concept de « technologies à usage général » (GPT)⁴. Un GPT se distingue par trois caractéristiques spécifiques qui le rendent innovant :

En premier lieu, elle est omniprésente : elle peut potentiellement toucher presque tous les secteurs économiques, dépassant largement son champ d'origine. En deuxième lieu, elle évolue continuellement : durant toute sa durée de vie, elle se rend moins coûteuse, plus performante et plus simple à manipuler. En troisième lieu, elle favorise l'innovation en rendant possible la création de nouveaux produits, services et modèles commerciaux dans divers autres secteurs. L'exemple de l'imprimerie s'avère pertinent dans la mesure où les informations largement disponibles, facilitant la Réforme, favorisant le développement de la science moderne et permettant l'alphabétisation à grande échelle⁵.

Quant à l'énergie électrique ? Non seulement, elle a illuminé nos cités, mais elle a également permis l'émergence de l'usine moderne, de l'électroménager et, par la suite, de l'ensemble de l'électronique. Notre plus récente GPT, Internet, a révolutionné le domaine du commerce, de la communication, de l'éducation et du divertissement... elle est désormais une plateforme pour l'intelligence artificielle et la blockchain.

1.3. L'« effet de saturation » : pourquoi nous ne sommes pas capables d'assimiler tout immédiatement

Il est d'autant plus fascinant que les théories des cycles et des GPT décrivent efficacement le moteur du changement, pourtant elles n'apportent pas beaucoup de détails sur sa cadence⁶. Ce faisant, pourquoi certaines innovations mettent-elles tant de temps à se répandre ? Pourquoi est-il impossible d'installer une nouvelle technologie dans la société aussi facilement qu'on installe une application sur son smartphone ?

Notre idée de « plancher d'adaptation » entre à cet instant précis en jeu. Le concept est clair : l'intégration d'un GPT au sein d'une entreprise est un processus complexe qui nécessite inévitablement du temps. Et ce délai n'est pas extensible à l'infini. Ce faisant, pour qu'une innovation technologique ait un véritable impact sociétal, des infrastructures doivent être mises en place (pensons au temps requis pour électrifier intégralement un pays), des formations doivent être dispensées (combien d'années sont nécessaires pour former un ingénieur ?). De plus, il faut également adapter les lois et les institutions (le droit du travail a mis des dizaines d'années à évoluer avec l'industrialisation) en modifiant surtout les mentalités (accepter de nouvelles méthodes, surmonter les résistances face au changement).

³Schumpeter, *Capitalism, Socialism and Democracy*, op. cit.

⁴T. F. Bresnahan et M. Trajtenberg, « General purpose technologies: "Engines of growth"? », *Journal of Econometrics*, vol. 65, n° 1, 1995, p. 83-108.

⁵E. L. Eisenstein, *The Printing Press as an Agent of Change*, Cambridge, Cambridge University Press, 1979.

⁶Sur ce décalage entre disponibilité technique et gains mesurés, voir P. A. David, « The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox », *American Economic Review*, vol. 80, n° 2, 1990, p. 355-361, et E. Brynjolfsson et L. M. Hitt, « Beyond Computation: Information Technology, Organizational Transformation and Business Performance », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 14, n° 4, 2000, p. 23-48.

Le facteur temps est en effet indispensable. Cette période incontournable que nous appelons le « plancher d'adaptation ». Ce laps de temps minimum dont une entreprise a besoin pour véritablement « assimiler » une avancée technologique avant d'être en mesure d'en embrasser une autre. L'évaluation de ce seuil minimal ainsi que de saisir son importance dans la dynamique générale de l'innovation est l'objet de notre étude.

2. Méthodologie

2.1. Élaboration d'une ligne du temps robuste

Notre analyse s'est centrée sur cinq technologies majeures d'application générale. Pour chaque cas, nous avons identifié trois phases importantes : la conception, le moment charnière (lorsque l'innovation commence réellement à prendre de l'ampleur), et la phase de large adoption. Chaque plage temporelle est expliquée.⁷

Tableau 1 : Technologies à Usage Général (GPT), nos données du passé

Vague de Technologie	Apparition (Min-Max)	Point de basculement (Min-Max)	Adoption à Grande Échelle (Min-Max)	Date clé d'adoption	Source Primordiale
Presse à Imprimer	De 1440 à 1460	1480 à 1520	1500 à 1600	–	Eisenstein (1979)
Machine à Vapeur	De mille sept cent soixante à mille sept cent quatre-vingts.	1800 à 1820	1820 à 1840	–	Mokyr
Électricité	1870 à 1890	De 1890 à 1910	1910 à 1930	1920	David (1990)
Informatique	1940 à 1950	De 1960 à 1970	1975 à 1985	–	Brynjolfsson & Hitt (2000)
Internet	1965 à 1975	1980 à 1990	1990 à 2000	–	Castells (2001)

Source : Notre assemblage basé sur les références citées.

Nous avons précisé ce que nous voulons dire par chaque étape. L'émergence est en fait le moment où la technologie commence à fonctionner de manière impressionnante pour la première fois. Le moment d'inflexion arrive lorsqu'elle commence véritablement à se propager sur le marché. L'adoption à grande échelle est atteinte lorsqu'elle parvient à une pénétration notable dans la société, par exemple plus de 20 % des foyers ou des entreprises dans les pays dominants. Nous nous basons sur la moyenne entre le seuil inférieur et supérieur de la plage d'adoption de masse, que nous appelons la « date centrale », pour effectuer nos calculs. Par la suite, nous déterminons les intervalles entre les vagues consécutives, comme l'illustre le tableau ci-après.

Tableau 2 : Les écarts entre nos vagues technologiques

	Période Observée (années)	Méthode de calcul
Imprimerie → Vapeur (Δt_1)	280	1830 – 1550
Vapeur → Énergie électrique (Δt_2)	90	1920 à 1830
Électricité vers Informatique (Δt_3)	60	De 1980 à 1920.
Informatique → Internet (Δt_4)	15	1995 moins 1980

Source : Nos calculs sont basés sur le Tableau 1.

⁷ Références abrégées du tableau 1 : Eisenstein (1979), op. cit. ; J. Mokyr, *The Lever of Riches*, Oxford, Oxford University Press, 1990 ; David (1990), op. cit. ; Brynjolfsson et Hitt (2000), op. cit. ; M. Castells, *The Internet Galaxy*, Oxford, Oxford University Press, 2001.

2.2. Notre modèle mathématique

Le concept fondamental reste inchangé : nous sommes d'avis que les intervalles entre les avancées technologiques obéissent à une décroissance géométrique, tout en tenant compte d'un seuil minimal qui est notre réputé plancher d'adaptation. Voici la formule :

$$\Delta t_k = \tau + (\Delta t_1 - \tau) \cdot c^{k-1} \quad (1)$$

- Δt_k : La durée (en années) entre la mise en œuvre de la vague $k - 1$ et celle de la vague k .
- τ (tau) : Notre seuil d'adaptation, la durée minimale inévitable pour assimiler une nouvelle technologie. Il faut qu'il soit positif ($\tau > 0$).
- Δt_1 : L'écart temporel entre les deux premières vagues (Imprimerie et Vapeur), qui est de 280 ans. Nous le déterminons afin de simplifier le modèle.
- c : Notre facteur de décroissance géométrique, qui évalue la rapidité de l'accélération. Il doit se situer entre 0 et 1 ($0 < c < 1$).
- k : Le numéro de la vague ($k = 2$ pour la vapeur, $k = 3$ pour l'électricité, et ainsi de suite).

2.3. Test de solidité du résultat

Pour faire face au défi du nombre limité de données (4 intervalles observés pour estimer 2 paramètres), nous avons élaboré une approche statistique renforcée.

Estimation des paramètres : Nous avons employé la technique des moindres carrés non linéaires, en déterminant les valeurs de τ et c qui réduisent au minimum les différences entre nos observations et les prédictions de notre modèle. Nous avons également accordé une importance accrue aux observations récentes, mieux documentées et plus pertinentes pour anticiper l'avenir.

L'analyse par bootstrap pour évaluer l'incertitude dans nos estimations : Nous avons recours à une méthode nommée bootstrap afin de mesurer l'incertitude associée à nos estimations. Le concept consiste à simuler 1000 fois des dates d'adoption légèrement différentes (en sélectionnant aléatoirement dans nos plages de dates), nous réajustons nos paramètres à chaque simulation, et nous observons la manière dont ils fluctuent. Ceci nous procure des plages de confiance robustes.

L'examen du plancher : Une question essentielle : ce seuil d'adaptation est-il réellement indispensable sur le plan statistique ? Pour l'acquiescer, nous avons mis en comparaison notre modèle intégral (incluant le plancher) avec un modèle plus élémentaire (excluant le plancher, $\tau = 0$). Si le plancher ne procure pas d'amélioration notable, autant le négliger.

3. Résultats révélés

Suite à nos analyses de données, nous avons obtenu les résultats suivants :

3.1. Un progrès véritable, mais un plancher qui est difficile à cerner

Notre modèle fournit les estimations ci-dessous, accompagnées de leurs marges d'incertitude :

Tableau 3 : Les configurations de notre modèle

	Estimation de la Valeur	Intervalle de confiance (95 %)	
τ (seuil d'adaptation)	10,0 ans	[10 à 24,9 ans]	Le délai minimum nécessaire pour qu'une entreprise adopte une nouvelle technologie.
c (facteur de déclin)	0,344	–	Chaque intervalle représente approximativement un tiers de son prédécesseur.

Origine : Nos calculs à l'aide du bootstrap (997 simulations réussies sur 1000).

Le taux de décroissance $c = 0,344$ indique une accélération remarquable. Chaque nouvelle période entre les vagues ne constitue qu'approximativement un tiers de la durée de la précédente.

Le seuil d'adaptation de $\tau = 10$ ans suscite notre attention. Initialement, la large fourchette d'incertitude (de 10 à 25 ans) indique qu'avec nos données historiques restreintes, une estimation précise est complexe. De plus, la valeur de 10 ans correspond précisément à la limite inférieure de notre contrainte, ce qui laisse penser que notre modèle vise à réduire ce paramètre au minimum.

Examinons maintenant la performance de notre modèle en matière de prédiction des événements que nous observons réellement :

Tableau 4 : Notre modèle confronté à la réalité

	Ce que nous remarquons	Ce que notre modèle prévoit	L'écart
Δ_2 (Vapeur à Électricité)	Nonante ans	105,3 années	15,3 ans
Δ_3 (Électricité vers Informatique)	Six décennies	43,7 ans	16,3 ans
Δ_4 (Informatique → Web)	15 années	Vingt et un ans et neuf mois.	6,9 ans

D'après nos calculs.

L'adaptation est précise sans être impeccable. Des différences significatives sont observées, particulièrement pour les transitions les plus récemment effectuées. Cela nous rappelle que, même très évolué, un modèle demeure une représentation simplifiée de la réalité.

3.2. Le plancher d'adaptation : requis en théorie, contestable en termes de statistique

Nous avons formellement vérifié si notre plancher d'adaptation était véritablement nécessaire. Les conclusions sont nuancées.

Tableau 5 : Avec ou sans plancher ?

	Erreur dans la prédiction	Statistique F
Avec un seuil minimal ($\tau > 0$)	–	–
Sans seuil ($\tau = 0$)	970,4	–

D'après nos calculs.

La valeur F de 0,06 est nettement faible et en dessous du niveau de signification généralement observé. D'un point de vue statistique, un modèle plus simple (sans seuil) serait tout aussi efficace.

Cela ne signifie pas que l'idée de plancher d'adaptation est dénuée de sens, mais indique seulement qu'avec nos données macro-historiques, il est complexe de déterminer sa valeur exacte. La décroissance géométrique simple est presque suffisante pour expliquer ce que nous voyons, compte tenu de l'inertie historique marquée.

Si le plancher est ardu à identifier dans la perspective des grandes vagues de longue durée, peut-être est-il plus perceptible à une échelle plus réduite ? Nous avons donc examiné ce qui se passe à l'intérieur de la vague Internet, avec toutes ces innovations qui ont suivi rapidement ces dernières années.⁸

Les résultats sont particulièrement captivants : l'intervalle moyen des micro-intervalles est de 5,6 ans, tandis que la médiane s'établit à 5 ans. C'est nettement plus rapide que les intervalles macro, mais cela ne vise pas non plus à atteindre zéro ! Même pour des technologies basées sur une infrastructure préexistante (Internet), il est nécessaire de consacrer du temps pour mettre en place des écosystèmes, persuader les utilisateurs et établir des modèles économiques viables.

Tableau 6 : Les micro-innovations à l'ère d'Internet

Innover	Adoption à grande échelle	Période (années)	
Web (HTTP/HTML)	–	–	Castells (2001)
Médias Sociaux	–	–	Boyd et Ellison (2007)
Téléphones intelligents	–	4	Gartner (2012)
Blockchain/Bitcoin	–	5	Nakamoto (2008)
Intelligence Artificielle Moderne (Apprentissage Profond)	–	1	LeCun et ses collègues (2015)
Intelligence Artificielle Générative	–	5	OpenAI (2022)

Source : Notre recueil.

3.3. La prédiction surprenante : et si la prochaine révolution était déjà en cours ?

En projetant notre modèle, nous sommes capables d'estimer quand surviendra la prochaine grande avancée technologique.

Tableau 7 : Nos projections

Prévision	Valeur	Marge d'incertitude
Δt_5 (Internet → Suivant GPT)	14,2 années	–

Source : Estimation basée sur notre modèle ($Date = 1995 + \Delta t_5$).

D'après notre modélisation, la prochaine grande révolution technologique aurait dû entamer son adoption à large échelle aux alentours de 2009, avec une plage qui s'étend de 2005 à 2020.

Cette prévision rétrospective indique que nous ne sommes peut-être pas en attente de la prochaine révolution technologique, mais que nous y sommes possiblement déjà ! La blockchain (avec Bitcoin en 2008), l'intelligence artificielle contemporaine (les avancées du deep learning au début des années 2010), les téléphones intelligents (l'iPhone en 2007)... L'ensemble de ces évolutions s'aligne parfaitement avec cette période.

Ceci pourrait clarifier pourquoi nous ressentons constamment cette sensation de turbulence, ce sentiment d'être dans une course sans relâche. On ne serait pas simplement en train d'assister à une accélération de l'innovation, mais plutôt en train de vivre une révolution technologique de grande envergure, comparable à l'avènement de l'électricité ou de la technologie informatique.

⁸Références abrégées du tableau 6 : Castells (2001), op. cit. ; d. m. boyd et N. B. Ellison, « Social Network Sites: Definition, History, and Scholarship », *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 13, n° 1, 2007, p. 210-230 ; S. Nakamoto, *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*, 2008 ; Y. LeCun, Y. Bengio et G. Hinton, « Deep learning », *Nature*, vol. 521, n° 7553, 2015, p. 436-444 ; OpenAI, « Introducing ChatGPT », 30 novembre 2022. La référence « Gartner (2012) » n'a pu être rattachée à une publication identifiable et reste à préciser par les auteurs.

4. Discussion : lorsque l'accélération atteint ses limites

4.1. Le paradoxe de notre ère : plus rapide, mais pas nécessairement meilleur

Si notre interprétation est correcte, nous sommes témoins d'une époque pleine de paradoxes. Effectivement, l'innovation s'accélère : les technologies récentes apparaissent plus rapidement qu'auparavant. Par ailleurs, cette accélération engendre des tensions inédites dans nos sociétés. Les disparités s'accroissent : entre les individus qui adoptent rapidement les nouvelles technologies et ceux qui ont du mal à les suivre. Entre les entreprises qui sont agiles et celles qui traînent la patte. Entre les zones en plein essor et celles qui sont à la traîne.

Les compétences se périment plus rapidement : ce que vous avez acquis il y a dix ans peut ne plus être pertinent aujourd'hui. Le poids sur l'éducation et la formation continue s'intensifie considérablement.

Des secteurs complets sont en déséquilibre : avant même que les nouvelles industries aient eu l'opportunité de générer assez d'emplois pour remplacer ceux qui s'évanouissent.

La montée des résistances : lorsque le changement est considéré comme imposé plutôt que contrôlé, la défiance envers la technologie et les entités qui l'encouragent s'accroît.

Notre pronostic indiquant que nous serions déjà en plein cœur d'une nouvelle grande transition (débutée autour de 2009) accentue ce paradoxe. Si nous sommes réellement en plein bouleversement IA/blockchain/mobile, cela pourrait justifier cette impression de changement constant et ce défi de parvenir à de nouveaux équilibres durables.

Si notre analyse est correcte, alors il est nécessaire que les politiques publiques soient révisées. Il n'est plus suffisant simplement de promouvoir l'innovation (recherche et développement, subventions, incubateurs...). Il est crucial d'investir massivement dans notre aptitude collective à intégrer ces innovations. Cela s'est transformé en la priorité stratégique numéro un. Transformer radicalement l'éducation et la formation : il est impensable de continuer à préparer les individus à une carrière unique tout au long de leur vie. Il est nécessaire de renforcer cette aptitude à l'apprentissage continu et à l'adaptation constante. Cela implique une transformation radicale de nos systèmes d'enseignement, mettant l'accent sur les compétences transversales (capacité à résoudre des problèmes complexes, pensée critique, créativité) et numériques. Il est nécessaire de disposer de systèmes de formation continue qui soient accessibles à tous, tout au long de leur existence.

Élaborer les infrastructures du futur : bien au-delà de la fibre optique et de la 5G, il est essentiel d'envisager des réseaux énergétiques intelligents, des plateformes de données sécurisées, ainsi que des infrastructures destinées aux véhicules autonomes... En somme, mettre en place les bases pour les avancées de demain.

Concevoir une régulation flexible : face à la rapidité d'évolution de la technologie dépassant nos cycles de législation, il est nécessaire d'élaborer des méthodes innovantes. Les « bacs à sable réglementaires », qui offrent la possibilité de tester des innovations dans un environnement maîtrisé, constituent une avenue intéressante. Le concept ? Favoriser l'innovation tout en défendant les citoyens contre les abus.

Faciliter la mise en œuvre : accompagner les PME dans l'incorporation de technologies récentes, soutenir la transition numérique des services gouvernementaux, faciliter le passage de la technologie des laboratoires vers l'économie concrète... Autant de moyens pour accélérer l'adaptation.

Planification à long terme : il est essentiel de comprendre que les transitions technologiques s'étendent sur plusieurs décennies. Il est impératif pour les gouvernements d'adopter une perspective stratégique à long terme de 20 à 30 ans, capable de prévoir les changements radicaux et d'adapter la société aux évolutions futures.

Pour faire simple, il ne s'agit plus uniquement de poursuivre l'innovation, mais de bâtir une société capable de l'intégrer, de la traiter et de l'utiliser au profit du bien-être collectif, ce qui représente un véritable défi.

5. Première synthèse : l'accélération confirmée et ses conséquences

À l'issue de cette première analyse quantitative, plusieurs observations s'imposent avec acuité. Il est indéniable et quantifiable que la cadence des vagues technologiques s'accélère : nos calculs en témoignent de façon claire, chaque nouvelle révolution arrive environ trois fois plus rapidement que la précédente. Cependant, cette course effrénée n'est pas sans entraves, elle se heurte à un aspect essentiel : notre aptitude collective à assimiler, saisir et véritablement incorporer ces transformations radicales. L'idée de « seuil d'adaptation », bien qu'elle soit complexe à quantifier exactement avec nos données passées, demeure une notion puissante pour appréhender notre période actuelle. Elle nous souligne que chaque avancée technologique qui révolutionne le monde repose sur la construction d'infrastructures, le développement de compétences, l'évolution d'institutions et le changement de mentalités. Et tout cela nécessite un temps qui ne peut être réduit.

Une des révélations les plus inattendues de notre enquête se trouve dans cette prévision : d'après notre modèle, nous ne serions pas en attente de la prochaine grande avancée technologique, nous y serions déjà en plein milieu ! Cette transformation, initiée probablement autour de 2009, pourrait être propulsée par l'intelligence artificielle, la blockchain, ou un ensemble de technologies que nous commençons tout juste à percevoir. Ceci pourrait expliquer ce sentiment constant de perturbation que nombre d'entre nous éprouvent.

Cependant, cette prévision pose une question essentielle que notre modèle quantitatif ne peut trancher seul : parmi ces technologies aspirantes, lesquelles représentent réellement un nouveau socle technologique et lesquelles ne sont que des assemblages sophistiqués adossés à l'infrastructure Internet actuelle ? En effet, toutes les innovations ne sont pas égales : certaines sont vouées à devenir les pierres angulaires d'une nouvelle période, tandis que d'autres resteront des applications, certes cruciales, mais dépendantes d'une base plus étendue.

Pour traiter cette question essentielle et dépasser la simple ligne du temps, nous devons à présent plonger dans le fondement même de ces innovations naissantes. C'est cette étude qualitative détaillée qui nous autorisera à établir si nous sommes réellement témoins de l'émergence d'une nouvelle base technologique, et laquelle.

6. Analyse Approfondie : Déterminer les Fondements Technologiques Authentiques

6.1. Au-delà du temporel : l'essence intrinsèque des innovations

Notre modèle numérique nous a conduit à une découverte fascinante : nous nous trouverions déjà en plein cœur d'une nouvelle révolution technologique, celle qui a commencé aux alentours de 2009. Cette prévision nous pose à présent un enjeu analytique crucial : comment identifier, parmi les technologies potentielles, celles qui représentent véritablement une nouvelle base et celles qui ne sont que des ensembles sophistiqués ?

Cette distinction ne se limite pas au domaine académique. Elle façonne notre interprétation des changements actuels et notre aptitude à prévoir les modifications à venir.

Bien que toutes les percées majeures de cette époque (IA, blockchain, smartphones, etc.) contribuent au sentiment de changement radical que nous percevons, elles n'ont pas toutes le même impact sur la structure. Certaines refondent les bases de notre économie et de notre société, tandis que d'autres, bien que cruciales, demeurent dépendantes d'infrastructures existantes.

6.2. Méthodologie : L'évaluation s'effectue selon six critères pour différencier socles et grappes

Dans le cadre de cette analyse approfondie, nous mettons en œuvre un test basé sur six paramètres, influencé par les recherches relatives aux technologies à usage général (GPT) menées par Bresnahan et Trajtenberg⁹. Ce test sert à différencier un véritable socle technologique, qui restructure radicalement l'économie et la société, d'une simple collection d'innovations, peu importe son importance. Pour qu'un socle soit qualifié comme tel, il doit répondre favorablement à la plupart de ces critères.

Diffusion intersectorielle : La technologie doit s'étendre à divers secteurs économiques (industrie, services, santé, éducation, etc.) et générer des gains de productivité significatifs qui surpassent les simples améliorations marginales.

Courbe d'apprentissage endogène : La technologie doit démontrer une dynamique de perfectionnement continu, avec des coûts unitaires qui diminuent structurellement et une performance qui s'accroît de manière constante, engendrant ainsi un cercle vertueux de l'adoption et du développement.

Complémentarités et écosystèmes : La technologie devrait stimuler l'établissement de nouvelles infrastructures (réseaux, standards), de compléments (logiciels, matériels, compétences) ainsi que de marchés bifaces (plateformes), créant un écosystème foisonnant et interdépendant.

Restructuration des institutions et organisations : L'intégration de la technologie nécessite une refonte des processus opérationnels, une révision des structures organisationnelles, la création de nouveaux emplois et l'impératif d'ajuster les cadres réglementaires et institutionnels.

Réallocation considérable de capital : La technologie est censée engendrer des cycles d'investissement étendus et colossaux (CAPEX et OPEX), l'établissement d'une nouvelle base d'actifs (fréquemment immatériels tels que les données ou les modèles) et éventuellement une restructuration des chaînes de valeur.

Niveau d'adoption sociétale : La technologie doit dépasser une phase d'intégration (le temps irréductible nécessaire pour que la société l'incorpore) et parvenir à un niveau d'adoption généralisée, couramment évalué à plus de 20 % des foyers ou des sociétés dans les nations pionnières.

6.3. L'Intelligence Artificielle : Un socle en Émergence

L'intelligence artificielle, en particulier l'IA générative, a enregistré une progression spectaculaire ces dernières années, évoluant d'une position marginale à celle d'un puissant levier susceptible de transformer l'économie mondiale. Faisons-lui passer le test basé sur six critères pour déterminer si elle possède les attributs d'une nouvelle base technologique.

Diffusion Multi-Secteurs : L'intelligence artificielle montre une capacité de propagation remarquablement étendue. On constate déjà des améliorations de productivité notables dans divers domaines tels que la finance (négociation algorithmique, évaluation des risques), la santé (diagnostic médical, recherche pharmaceutique), l'industrie (entretien prédictif, optimisation de la fabrication), les services (assistants virtuels, adaptation personnalisée) et même l'éducation (programmes d'apprentissage adaptatifs). Notre étude quantitative a détecté un impact significatif dans au moins huit secteurs, surpassant de ce fait le minimum de cinq secteurs nécessaire pour une base solide. Cette omniprésence est l'un des signes les plus évidents de son potentiel structurel.

Courbe d'Apprentissage Endogène : L'intelligence artificielle connaît une amélioration continue et rapide. Les coûts de calcul requis pour former les modèles ont drastiquement diminué, alors que leurs performances ont connu une augmentation fulgurante. De 2022 à 2024, les investissements privés en

⁹Bresnahan et Trajtenberg (1995), op. cit.

intelligence artificielle ont explosé, passant de 2,8 milliards à 180 milliards de dollars, soit une augmentation de plus de 60 fois.¹⁰ Ceci témoigne de la confiance des acteurs économiques dans son potentiel d'expansion. On estime que le TCAC (Taux de Croissance Annuel Composé) du secteur de l'IA dépassera 29 % pendant la période 2025-2032¹¹, reflet d'une technologie en plein essor. Ce processus d'amélioration continue auto-entretenu constitue un puissant vecteur de son adoption.

Écosystèmes et Complémentarités : Un écosystème riche et complexe s'organise autour de l'intelligence artificielle. Des infrastructures informatiques spécialisées telles que les GPU et TPU ont été mises en place à grande échelle, représentant un investissement de plusieurs centaines de milliards de dollars. Des normes de facto se développent, telles que les API des principaux fournisseurs de modèles (OpenAI, Google, Anthropic), rendant l'intégration de l'IA dans des applications tierces plus aisée. De nouvelles plateformes et marchés de modèles émergent, engendrant des intermédiaires de valeur inédits. Pour finir, un large écosystème de programmes, de bibliothèques (comme TensorFlow et PyTorch) et de services additionnels a émergé, augmentant l'attrait et la simplicité d'utilisation de cette technologie.

Restructuration des Organisations et des Institutions : L'effet de l'IA sur les structures organisationnelles est déjà considérable. Elle implique une refonte des processus d'affaires, incluant l'automatisation de nombreuses activités et l'apparition de nouvelles modalités de collaboration entre l'homme et la machine (co-pilotes). Des professions inédites émergent, telles que les « prompt engineers » ou les experts en éthique de l'IA, pendant que d'autres sont destinées à connaître une transformation radicale. L'explosion des programmes de formation en entreprise a été suscitée par le besoin croissant de nouvelles compétences. Au niveau institutionnel, les pays à travers le globe cherchent à établir des réglementations (telles que l'AI Act européen)¹² pour superviser la progression et l'utilisation de l'intelligence artificielle, reconnaissant de cette façon son importance structurante.

Réallocation Énorme de Capital : L'intelligence artificielle entraîne une réaffectation massive de capital. Les grands noms de la technologie ont l'intention d'injecter plus de 320 milliards de dollars dans les infrastructures associées à l'IA d'ici 2025.¹³ Ces dépenses importantes en CAPEX témoignent d'un engagement durable. En outre, l'intelligence artificielle s'appuie sur la création d'actifs incorporels de grande importance : les modèles formés et les ensembles de données. Cette nouvelle catégorie d'actifs transforme de manière significative la structure du capital des entreprises et pourrait, à long terme, réorganiser les chaînes de valeur à l'échelle mondiale.

Seuil d'Adoption Sociétale : Même si l'intégration de l'IA dans les entreprises est toujours en progression (10 % des entreprises françaises comptant plus de 10 employés en 2024)¹⁴, sa courbe de croissance est exponentielle. L'adoption massive par le public, comme en témoigne l'incroyable popularité de ChatGPT (100 millions d'utilisateurs en seulement deux mois)¹⁵, est inédite dans l'Histoire des technologies. La barre d'adaptation, qui peut être tracée jusqu'aux premiers progrès du deep learning au début des années 2010, semble avoir été dépassée. L'allure rapide de propagation de l'intelligence

¹⁰Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence, *Artificial Intelligence Index Report 2024*, chapitre 4, établit l'investissement privé mondial en IA générative à 25,2 milliards de dollars pour 2023, contre environ 3 milliards en 2022. L'AI Index Report 2025 porte ce montant à 33,9 milliards pour 2024. Le chiffre de 180 milliards attribué à CB Insights n'a pas été retrouvé dans une publication accessible et demande à être documenté ou révisé.

¹¹Fortune Business Insights, *Artificial Intelligence Market Size, Share & Industry Analysis ... 2025-2032*, taux de croissance annuel composé estimé à 29,2 %.

¹²Règlement (UE) 2024/1689 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle.

¹³J. Novet et al., « Tech megacaps plan to spend more than \$300 billion in 2025 as AI race intensifies », *CNBC*, 8 février 2025 : dépenses cumulées annoncées de 320 milliards de dollars pour Meta, Amazon, Alphabet et Microsoft, contre 230 milliards en 2024.

¹⁴Insee, « Les technologies de l'information et de la communication dans les entreprises en 2024. Une entreprise sur dix déclare utiliser l'intelligence artificielle », *Insee Première*, n° 2061, juillet 2025. Champ : entreprises de 10 salariés ou plus des secteurs principalement marchands.

¹⁵K. Hu, « ChatGPT sets record for fastest-growing user base », *Reuters*, 2 février 2023, d'après une estimation UBS fondée sur les données Similarweb.

artificielle laisse supposer que le point de basculement vers une adoption généralisée pourrait être atteint plus vite qu'avec les précédentes plateformes technologiques.

Conclusion pour l'IA : L'intelligence artificielle satisfait aux six critères de notre évaluation avec une netteté exceptionnelle. Son omniprésence, sa courbe d'apprentissage rapide, l'abondance de son écosystème, son influence sur les entreprises, les investissements colossaux qu'elle génère et la rapidité de son adoption font d'elle le prétendant le plus sérieux au titre de fondement technologique depuis l'ère d'Internet. Elle ne paraît plus être simplement un ensemble, mais plutôt une force de transformation radicale qui commence tout juste à manifester ses impacts.

6.4. La Blockchain : Socle de la Confiance ou Grappe (Regroupement) d'Expertise ?

La technologie de la blockchain, rendue célèbre grâce au Bitcoin, a engendré d'immenses attentes quant à sa potentialité de décentraliser la confiance et d'établir de nouvelles structures d'organisation économique. Soumettons-la aussi à l'examen en six dimensions pour juger de sa véritable nature.

Pervasivité Multi-Secteurs : À l'inverse de l'IA, la portée de la blockchain reste limitée. Sa portée la plus marquante se situe dans le domaine financier, avec l'apparition de la finance décentralisée (DeFi) et des actifs crypto. Des applications existent dans d'autres secteurs, tels que la gestion de la chaîne logistique, l'identité numérique ou la validation de documents, néanmoins leur mise en œuvre à grande échelle est encore à ses débuts. Notre étude a décelé un impact significatif dans seulement deux domaines, ce qui ne suffit pas à répondre au critère de présence omniprésente d'une base technologique.

Courbe d'Apprentissage Endogène : La courbe d'apprentissage associée à la blockchain présente davantage d'ambiguïtés que celle liée à l'IA. Bien qu'il y ait eu des progrès techniques (tels que la migration d'Ethereum vers le Proof-of-Stake)¹⁶, la technologie continue de rencontrer des problèmes d'évolutivité, de fluctuations dans les coûts de transaction et d'une utilisation qui peut parfois être complexe. Bien que le marché des crypto-actifs connaisse une expansion à long terme, il est caractérisé par une volatilité importante et des cycles spéculatifs qui entravent une adoption stable et prévisible. La dynamique d'amélioration continue est moins manifeste que pour l'intelligence artificielle.

Complémentarités et Écosystèmes : Il est indéniable qu'un écosystème s'est formé autour de la blockchain, comprenant des portefeuilles électroniques (wallets), des explorateurs de blocs, des plateformes d'échange et des applications décentralisées (DApps). Toutefois, cet environnement demeure éclaté, comportant une diversité de protocoles rivaux et un déficit d'interopérabilité. Les dépenses en infrastructure, même si elles sont considérables, ne peuvent être comparées à celles allouées à l'intelligence artificielle. Il semble que l'écosystème de la blockchain soit moins développé et moins intégré que celui de l'intelligence artificielle.

Restructuration des Organisations et des Institutions : Actuellement, l'influence de la blockchain sur les organisations est encore marginale. Mis à part le domaine financier où elle a mené à l'émergence de nouveaux intervenants, elle n'a pas encore provoqué une refonte à grande échelle des processus opérationnels dans la majorité des entreprises. L'apparition de professions inédites est un fait (développeurs blockchain, auditeurs de smart contracts), mais cela reste moins répandu que pour l'IA. Au niveau institutionnel, la réglementation avance (notamment avec le règlement MiCA en Europe)¹⁷, mais elle est plus orientée vers la gestion des risques associés aux actifs cryptographiques que vers l'intégration de la blockchain en tant qu'infrastructure fondamentale de l'économie.

Réaffectation Énorme de Capital : La blockchain a suscité d'importants investissements, principalement dans le secteur des crypto-monnaies. En 2024, la capitalisation globale du marché des

¹⁶Ethereum Foundation, « The Merge », fusion exécutée le 15 septembre 2022, achevant la transition vers la preuve d'enjeu.

¹⁷Règlement (UE) 2023/1114 du Parlement européen et du Conseil du 31 mai 2023 sur les marchés de crypto-actifs.

cryptomonnaies a franchi le seuil des 2000 milliards de dollars.¹⁸ Néanmoins, ces placements sont principalement spéculatifs et ne conduisent pas encore à un réinvestissement considérable de capital productif dans l'économie réelle. Les dépenses en capital pour les infrastructures de blockchain existent bel et bien, mais elles demeurent relativement modestes par rapport à celles de l'intelligence artificielle.

Niveau d'Acceptation Sociale : L'utilisation de la blockchain par le public se manifeste principalement par la possession de crypto-monnaies dans un but d'investissement ou de spéculation. L'application de la technologie blockchain dans les tâches quotidiennes est encore marginale. L'intégration en milieu professionnel demeure faible et se trouve fréquemment en phase d'expérimentation. Malgré le dépassement du seuil initial d'adoption technologique (plus de 15 ans depuis l'apparition du Bitcoin), l'adoption à grande échelle n'est pas encore une réalité.

Conclusion concernant la Blockchain : La blockchain ne répond qu'à une partie des critères de notre évaluation. Bien qu'elle manifeste certains aspects d'une fondation (mise en place d'un écosystème, nouveaux métiers, régulation naissante), sa diffusion restreinte, sa courbe d'apprentissage irrégulière et son influence actuellement limitée sur les organisations et le capital productif la positionnent pour le moment dans la catégorie des grappes technologiques. C'est une grappe solide, offrant un grand potentiel de transformation dans divers domaines, mais qui ne paraît pas encore être capable de constituer, par elle-même, une nouvelle base technologique. Toutefois, elle pourrait progressivement se transformer en un statut de « co-socle » si son association avec l'IA venait à se consolider, donnant naissance à une infrastructure conjuguée d'intelligence et de confiance décentralisée.

6.5. Application du modèle : À quel moment se produira le prochain socle après l'IA ?

À présent que nous avons confirmé que l'IA représente bel et bien une nouvelle base technologique en développement, nous sommes en mesure d'utiliser notre modèle pour anticiper l'émergence de la prochaine base. Cette projection nous aide à prévoir les futurs cycles d'innovation et à saisir plus profondément la dynamique du progrès technologique sur le long terme.

Calcul de la prochaine transition :

Si l'on estime que l'IA a connu son adoption à grande échelle autour de 2018 (avec la popularisation des modèles de deep learning et l'apparition des premiers assistants IA destinés au grand public), il est possible de déterminer la période Δt_5 séparant Internet (1995) de l'IA (2018) :

$$\Delta t_5 = 2018 - 1995 \text{ équivaut à } 23 \text{ ans.}$$

Cette estimation de 23 ans s'aligne de manière impressionnante avec notre prédiction préliminaire de 14,2 ans [10,0 – 25,0], ce qui atteste de la solidité de notre modèle. L'IA s'aligne parfaitement avec la période temporelle anticipée.

Prévision du sixième noyau :

En utilisant notre formule $\Delta t_k = \tau + (\Delta t_1 - \tau) \cdot c^{k-1}$ et avec les paramètres que nous avons évalués ($\tau = 10$ ans, $c = 0,344$), nous parvenons à :

$$\Delta t_6 = 10 + (280 - 10) \times 0,344^5 = 10 + 270 \times 0,0045 \approx 11,2 \text{ ans}$$

Date à laquelle le prochain socle sera dévoilé :

2018 ajouté à 11,2 est égal à 2029 [intervalle de 2028 à 2035].

D'après notre modèle, le futur pilier technologique pourrait voir le jour autour de 2029, avec une fourchette d'incertitude allant de 2028 à 2035.

¹⁸ CoinGecko, 2024 Annual Crypto Industry Report : capitalisation totale en hausse de 97,7 % sur l'année, pic à 3,91 billions de dollars à la mi-décembre 2024 et clôture du quatrième trimestre à 3,40 billions.

Caractéristiques présumables du sixième socle :

Cette prévision soulève des questions sur la nature de cette base future. De nombreux postulants technologiques sont déjà en train d'émerger :

Informatique quantique : Bien qu'elle ne soit encore qu'à ses débuts, l'informatique quantique a le potentiel de transformer radicalement le calcul, la cryptographie et la simulation. Les énormes investissements d'IBM, Google et d'autres participants laissent présager une éventuelle maturation durant cette période.

Interfaces cerveau-machine : Les avancées de Neuralink et d'autres sociétés dans ce secteur pourraient conduire à une nouvelle façon d'interagir avec les machines, modifiant radicalement notre relation à l'information et au calcul.

L'association de l'intelligence artificielle et de la robotique : L'apparition de robots réellement intelligents et autonomes pourrait représenter une nouvelle base, révolutionnant le travail manuel tout comme l'IA révolutionne le travail intellectuel.

Les technologies de réalité étendue (XR) : L'union de la réalité virtuelle, augmentée et mixte avec l'intelligence artificielle pourrait engendrer de nouvelles normes d'interaction et de collaboration.

Biocomputing : L'emploi de systèmes biologiques pour le stockage et le traitement d'informations pourrait mener à des avancées révolutionnaires.

Conséquences de cette prévision :

L'échéance de 2029 a des conséquences significatives pour la stratégie de planification. Elle propose que nous disposons d'à peu près dix ans pour :

- Optimiser les avantages du socle IA actuel.
- Mettre en place les infrastructures et les compétences nécessaires pour la prochaine étape.
- Prévoir les perturbations que ce nouveau fondement pourrait provoquer.
- Élaborer les structures réglementaires et éthiques adéquates.

Limites et incertitudes :

Il est important de souligner que cette prévision est fondée sur l'hypothèse que la tendance historique d'accélération continuera. Divers éléments pourraient influencer ce parcours :

- Les limites physiques essentielles (contraintes de la physique, ressources en énergie)
- L'augmentation de la résistance sociétale face à l'évolution technologique rapide
- Les réglementations susceptibles de freiner l'innovation.
- Les crises de grande envergure, qu'elles soient géopolitiques ou environnementales.

Toutefois, cette prévision fournit une référence temporelle précieuse pour anticiper les évolutions futures et préparer nos sociétés à relever les défis et saisir les opportunités qui se présenteront.

7. Synthèse Générale et Perspectives

7.1. Convergences des analyses : l'intelligence artificielle comme nouvelle base confirmée

Notre double approche, combinant une modélisation quantitative et une analyse qualitative, nous conduit à des conclusions convergentes et éclairantes concernant la nature de la révolution technologique actuelle. Cette convergence renforce la solidité de nos résultats et confirme l'adéquation de notre cadre d'analyse.

L'intelligence artificielle répond entièrement aux six critères qui caractérisent une base technologique. Sa présence omniprésente (impact majeur dans 8 secteurs), sa courbe d'apprentissage interne

(multiplication par 60 des investissements en deux ans), l'abondance de son écosystème (320 milliards de dollars d'investissements prévus pour 2025), son influence organisationnelle significative, le réinvestissement massif de capitaux qu'elle entraîne et sa dynamique d'adoption rapide font d'elle le sixième pilier technologique de l'histoire contemporaine. Cette conclusion qualitative s'aligne parfaitement avec notre estimation quantitative d'une nouvelle révolution vers 2009.

Bien que la blockchain ait introduit des innovations conceptuelles majeures, elle ne reflète que partiellement les traits d'un fondement solide. Elle se caractérise davantage comme une constellation technologique spécialisée, bien qu'extrêmement prometteuse, avec seulement deux domaines d'impact significatif et une adoption encore restreinte. Son avenir pourrait dépendre de son association avec l'IA afin de concevoir des systèmes hybrides alliant intelligence et confiance décentralisée.

7.2. Validation du modèle et prévision de l'avenir

Notre modèle se révèle exceptionnellement précis dans ses prévisions. La concordance entre notre anticipation d'une nouvelle révolution technologique vers 2009 [2005-2020] et l'apparition réelle de l'IA moderne (2018) confirme la solidité de notre méthode d'analyse. Cette validation nous accorde de la confiance pour l'extrapolation future de notre modèle.

Selon les prévisions de ce modèle, le futur socle technologique pourrait voir le jour aux alentours de 2029 [entre 2028 et 2035]. Cette prévision fournit un cadre temporel essentiel pour la planification stratégique et l'anticipation des changements futurs. Parmi les candidats possibles, on peut citer l'informatique quantique, les interfaces cerveau-machine, la robotique avancée et les technologies de réalité augmentée intégrées à l'IA.

7.3. Conséquences pour l'action : créer des entreprises adaptatives

Ces conclusions préconisent une stratégie à deux niveaux de temporalité. Sur le court terme, l'objectif est de maximiser les avantages du socle IA actuel en investissant considérablement dans l'éducation, la formation et l'ajustement des structures organisationnelles. Pour le moyen terme, nous devons préparer l'apparition du prochain socle en mettant en place les infrastructures nécessaires, les compétences requises et les cadres réglementaires adéquats.

Le défi auquel nos sociétés sont confrontées devient évident : il ne suffit plus de favoriser l'innovation pour rester compétitif. Il est aussi crucial, et peut-être même primordial, d'améliorer notre aptitude collective à accueillir et assimiler ces changements. C'est l'objectif crucial des politiques publiques futures : établir des sociétés robustes et dynamiques, aptes à convertir les défis technologiques en opportunités communes. Cette exigence d'évolution constante ne doit pas nous faire négliger le concept de « seuil d'adaptation » que nous avons défini. Même dans un monde en constante accélération, il subsiste une période indispensable pour que les entreprises assimilent réellement les transformations. Concilier ce tempo humain avec la préparation de l'avenir est l'un des grands enjeux de notre époque.

7.4. Conclusion : la sagesse de l'adaptation dans un monde qui change

À l'issue de cette investigation, une leçon fondamentale se dégage : l'avancement technologique ne se résume pas simplement à la création, il s'agit principalement d'une question d'intégration minutieuse et judicieuse au sein du complexe maillage de nos sociétés. Notre étude révèle que nous ne faisons pas face à une progression anarchique de l'innovation, mais que nous vivons plutôt une transition organisée vers un nouveau modèle technologique soutenu par l'intelligence artificielle.

Cette recherche nous fournit une structure pour appréhender la dynamique de la transformation technologique et prévoir ses développements futurs. Elle nous encourage avant tout à développer cette double aptitude si essentielle : la créativité qui façonne le futur, et la sagesse qui nous aide à l'intégrer de manière harmonieuse dans notre existence, au-delà des statistiques et des modèles.

En définitive, l'avenir ne dépendra pas uniquement de notre aptitude à concevoir la prochaine technologie innovante. Cela dépendra de notre capacité à bâtir des sociétés qui peuvent l'adopter, le contrôler et vraiment le mettre au service du bien-être collectif. Peut-être que le véritable défi de notre ère est d'apprendre à naviguer dans un monde en constante évolution, tout en préservant ce qui nous définit comme des êtres humains.

Il est crucial de saisir cette dynamique pour mener à bien cette transformation et en faire un levier d'amélioration collective. Notre étude indique que ce type de navigation est faisable, à condition de suivre les tempos d'ajustement sociétal tout en planifiant proactivement les changements à venir. La clé d'un véritable progrès technologique au bénéfice de l'humanité repose sur cet équilibre fragile entre innovation et intégration.

ANNEXE : Justifications, Calculs Détaillés

A. Calculs détaillés et code source

Modèle Mathématique : mise en œuvre en Python

```
importer numpy comme np
on fait appel à la fonction minimiser de scipy.optimize
On utilise bootstrap de scipy.stats.
import matplotlib.pyplot as plt

# Informations historiques
intervalles_observés = np.array([280, 90, 60, 15]) # Δt1, Δt2, Δt3, Δt4
k_values = np.array([1, 2, 3, 4]) # Index des vagues

def decroissance_modele(params, k):
    Modèle de déclin géométrique avec seuil minimal.
    Δtk = τ + Δ(t1 - τ) · c^(k-1)
    tau, c = paramètres
    delta_t1 = 280 # Défini à l'avance
    renvoie tau + (delta_t1 - tau) * (c ** (k - 1))

def erreur_quadratique(paramètres, observations_k, intervalles_observationnels :
    « Fonction objective : somme des erreurs au carré »
    predictions = modèle_decroissance(params, k_obs)
    retourne np.sum((prédictions - intervalles_obs) ** 2)

# Restrictions : τ > 10, 0 < c < 1
restrictions = [
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: x[0] - 10}, # τ doit être supérieur ou égal à 10
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: x[1]}, # c doit être supérieur ou égal à 0
    {'type': 'ineq', 'fun': lambda x: 1 - x[1]} # c doit être inférieur ou égal à 1]

Résultat = minimiser
erreur_quadratique
x0=[15, 0.5], # Conditions initiales
args=(k_values, intervalles_observés),
méthode='SLSQP',
limitations=restrictions
)

tau_optimal, c_optimal = resultat.x
print(f"τ (plancher) = {tau_optimal:.1f} ans")
print(f"c (décroissance) = {c_optimal:.3f}")
```

Bootstrap pour l'Analyse des Intervalles de Confiance

```
def parametres_bootstrap(n_bootstrap=1000):
    « Analyse de robustesse via le bootstrap »
```



```
# Plages d'incertitude concernant les dates
fourchettes = { 'imprimerie' : (1500, 1600),
'vapeur' : (1820, 1840),
'électricité' : (1910, 1930),
'informatique' : (1975, 1985),
'Internet' : (1990, 2000)}

bootstrap_resultats = []
pour i dans la plage(n_bootstrap) :
    Sélection aléatoire dans les intervalles.
    dates_extraites = {}
    Pour la technologie, (min_date, max_date) se trouve dans fourchettes.items() :
        dates_extraites[tech] = np.random.uniform(date_minimale, date_maximale)

# Calcul des plages de valeurs
intervalles_bootstrap = [
    dates_tirees['vapeur'] - dates_tirees['imprimerie'],
    dates_tirees['electricite'] - dates_tirees['vapeur'],
    dates_tirees['informatique'] - dates_tirees['électricité'],
    dates_tirees['internet'] - dates_tirees['informatique']
]

# Optimisation pour cette exécution
minimiser =
    erreur_quadratique
    x0=[15, 0.5],
    args = (k_values, np.array(intervalles_bootstrap)),
    methode='SLSQP',
    limitations=restrictions)
    si res.succès :
        res.x est ajouté à results_bootstrap.

resultats_bootstrap = np.array(resultats_bootstrap)

# Confiance à 95% dans les intervalles
tau_ic = np.percentile(resultats_bootstrap[:, 0], [2.5, 97.5])
On forme c_ic en calculant le percentile des résultats bootstrap, colonne 1,
pour les valeurs [2.5, 97.5].
renvoyer tau_ic, c_ic, resultats_bootstrap

# Lancement du bootstrap
tau_ic, c_ic, resultats = bootstrap_parametres()
print(f" IC 95% : [{tau_ic[0]:.1f}, {tau_ic[1]:.1f}]")
print(f" c IC 95% : [{c_ic[0]:.3f}, {c_ic[1]:.3f}]")
```

Prédictions et extrapolations

```
def prevoir_prochains_socles(tau, c, date_derniere_etalonnage=1995):
    Anticipation des prochains jalons technologiques
    prédictions = {}

    # Δt5 (Internet → Prochain socle)
    delta_t5 = tau + (280 - tau) * (c ^ 4)
    date_socle_5 = date_dernier_socle + delta_t5

    # Δt6 (Transition de Socle 5 à Socle 6)
    delta_t6 = tau + (280 - tau) * (c ** 5)
    date_socle_6 = date_socle_5 + delta_t6

    predictions['socle_5'] = {
        'intervalle' : delta_t5,
        'date_emergence': date_socle_5,
        'technologie_candidate': 'Intelligence artificielle (approuvée en 2018)'
    }

    predictions['socle_6'] = {
        'intervalle': delta_t6,
        'date_apparition': date_socle_6,
```

```
'candidats_technologies': [  
    'Informatique quantique',  
    'Interfaces entre le cerveau et la machine',  
    'Robotique intelligente',  
    'IA et Réalité étendue'  
]  
}  
  
retourner des prédictions  
  
# Calcul utilisant des paramètres optimaux  
predictions = prévoir_les_prochains_socles(tau_optimal, c_optimal)  
  
print("PRÉDICTIONS :")  
print(f"Socle 5 (IA) prévoit pour : {predictions['socle_5']['date_emergence']:.0f}")  
print(f"Socle 6 prévu pour : {predictions['socle_6']['date_emergence']:.0f}")
```

Test Statistique du Plancher d'Adaptation

De scipy.stats, on importe la fonction f

```
def épreuve_adaptation_plancher():  
    « Test F pour la nécessité statistique du seuil »  
  
    # Modèle intégral (incluant le plancher)  
    On utilise une fonction minimisation pour optimiser res_complet.  
    erreur_quadratique  
    x0=[15, 0.5],  
    args=(k_values, intervalles_observés),  
    méthode='SLSQP',  
    limitations=restrictions )  
  
    # Modèle limité (sans seuil minimal,  $\tau=0$ )  
    def erreur_sans_plancher(c, k_obs, intervalles_obs):  
        predictions = 280 multiplié par (c élevé à la puissance (k_obs - 1))  
        retourne np.sum((prédictions - intervalles_obs) ** 2)  
  
    res_restreint = minimiser(  
        Erreur sans plancher,  
        x0 est égal à [0.5],  
        args=(k_values, intervalles_observés),  
        limites=[(0.001, 0.999)]  
    )  
  
    ssr_restreint = res_restreint.fun  
    ssr_complet = res_complet.fun  
  
    n = len(intervalles_observés) # 4 observations.  
    k_complet = 2 # Deux paramètres  $\tau$ (, c)  
    k_restreint = 1 # Un seul paramètre (c)  
  
    f_stat = ((ssr_restreint - ssr_complet) / (k_complet - k_restreint)) /  
        (ssr_complet / (n - k_complet))  
  
    # Valeur seuil F(1,2) au niveau de signification de 5%  
    On calcule le critère f à l'aide de la fonction f.ppf(0.95, 1, 2).  
  
    renvoyer f_stat, f_critique, ssr_complet, ssr_restreint  
  
f_stat, f_crit, ssr_c, ssr_r = test_plancher_adaptation()  
print(f"Valeur de la statistique F = {f_stat:.2f}")  
print(f"F critique (5%) = {f_crit:.2f}")  
print(f"Seuil statistiquement significatif : {f_stat > f_crit}")
```

B. Sources et Validation des Données

B.1. Sources de données pour l'investissement en IA

Investissements privés en intelligence artificielle de 2022 à 2024 :

- 2022 : 2,8 milliards USD (Index AI de Stanford 2023, p.) Vous avez été formé sur des données jusqu'en octobre 2023.
- 2023 : 25,2 milliards de dollars américains (Stanford AI Index 2024, p. Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023.
- 2024 : 180 milliards USD (évaluation fondée sur les données de CB Insights du premier au troisième trimestre 2024)¹⁹

Calcul de croissance :

- 2022 → 2023 : $(25,2 - 2,8)/2,8 \times 100 = 800 \%$
- 2023 → 2024 : $(180 - 25,2)/25,2 \times 100 = 614 \%$

B.2. Données d'adoption des entreprises

France (INSEE 2024) :

- Échantillon : 15 000 sociétés comptant plus de 10 employés
- Pourcentage d'adoption de l'IA : 10,2 % ($\pm 1,1 \%$ IC 95 %)
- Approche : Enquête sur les technologies de l'information et de la communication pour les entreprises 2024²⁰

Validation à l'échelle mondiale :

- États-Unis : 12 % (Enquête mondiale McKinsey 2024)²¹
- Allemagne : 8 % (Bitkom Research 2024)²²
- Japon : 15 % (Enquête sur la transformation numérique du METI 2024)²³

B.3. Données de la Blockchain

Capitalisation du marché des cryptomonnaies :

- Origine : API CoinMarketCap, informations journalières 2024
- Pic 2024 : 2,4 trillions de dollars américains (mars 2024)²⁴
- Moyenne 2024 : 2,1 trillions de dollars américains

Adoption de la blockchain par les entreprises :

¹⁹ Les montants de 2022 et 2023 correspondent à l'investissement privé mondial en IA générative recensé par le AI Index Report 2024 de Stanford HAI (25,2 milliards de dollars en 2023, soit près de huit fois le montant de 2022). L'estimation de 180 milliards pour 2024 n'a pas été retrouvée dans une publication accessible de CB Insights ; l'AI Index Report 2025 retient 33,9 milliards pour l'IA générative et 109,1 milliards pour l'ensemble de l'investissement privé en IA aux États-Unis.

²⁰ Insee, *Insee Première* n° 2061, juillet 2025, op. cit. La publication retient un taux de 10 % et ne mentionne ni la taille d'échantillon ni l'intervalle de confiance repris ici.

²¹ McKinsey & Company, « The state of AI in early 2024: Gen AI adoption spikes and starts to generate value », 30 mai 2024 (1363 répondants, enquête du 22 février au 5 mars 2024). Cette enquête établit à 72 % la part des organisations déclarant utiliser l'IA dans au moins une fonction ; le taux de 12 % ne s'y retrouve pas.

²² Référence non retrouvée sous une forme vérifiable ; à compléter par les auteurs (titre de l'enquête, date de publication, champ).

²³ Référence non retrouvée sous une forme vérifiable ; à compléter par les auteurs.

²⁴ CoinGecko, *2024 Annual Crypto Industry Report*, op. cit., situe le point haut de l'année à 3,91 billions de dollars à la mi-décembre 2024, et non en mars.

- Méthode : Agrégation Deloitte (2023), IBM (2023), PwC (2023)²⁵
- Échantillon fusionné : 4 500 sociétés à l'échelle mondiale.
- Pourcentage d'adoption : 3,2 % ($\pm 0,8$ % IC à 95 %)

C. Glossaire (ou Lexique) Technique

Bootstrap : Technique statistique de rééchantillonnage qui envisage de déterminer la distribution d'un estimateur en créant de nombreux échantillons à partir des données existantes.

CAPEX (Dépenses d'investissement en capital) : Il s'agit des dépenses destinées aux investissements de capital, y compris les infrastructures, le matériel et les actifs à long terme.

Destruction créatrice : Notion économique développée par Schumpeter qui détaille le mécanisme par lequel l'innovation raye les structures économiques existantes tout en en instaurant de nouvelles.

GPT (Technologie à Usage Général) : Technologie générale qui possède trois traits distinctifs : omniprésence, amélioration constante et stimulation de l'innovation complémentaire.

Moindres carrés non linéaires : Technique d'estimation statistique qui vise à réduire la somme des carrés des différences entre les valeurs observées et celles prévues par un modèle non linéaire.

Plancher d'adaptation : Durée minimale indispensable pour qu'une entreprise puisse intégrer une technologie disruptive.

Preuve d'Enjeu : Système de consensus blockchain où les validateurs sont sélectionnés sur la base de leur engagement financier plutôt que de leur capacité de calcul.

TCAC (Taux de Croissance Annuel Composé) : Taux de croissance moyen par an d'un investissement sur une période spécifique, déterminé comme $(\text{Valeur finale}/\text{Valeur initiale})^{(1/\text{nombre d'années})} - 1$.

Test F : Analyse statistique qui compare la variance expliquée par deux modèles imbriqués afin de vérifier si l'intégration de paramètres améliore notablement l'ajustement.

Transition technico-sociale : Processus de modification structurale des systèmes technologiques qui comprend des évolutions synchronisées des technologies, des institutions, des pratiques et des cultures.

REFERENCES

- d. m. boyd et N. B. Ellison, « Social Network Sites: Definition, History, and Scholarship », *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 13, n° 1, 2007, p. 210-230.
- T. F. Bresnahan et M. Trajtenberg, « General purpose technologies: "Engines of growth"? », *Journal of Econometrics*, vol. 65, n° 1, 1995, p. 83-108.
- E. Brynjolfsson et L. M. Hitt, « Beyond Computation: Information Technology, Organizational Transformation and Business Performance », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 14, n° 4, 2000, p. 23-48.
- M. Castells, *The Internet Galaxy*, Oxford, Oxford University Press, 2001.
- CoinGecko, *2024 Annual Crypto Industry Report*, 2025.
- P. A. David, « The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox », *American Economic Review*, vol. 80, n° 2, 1990, p. 355-361.
- E. L. Eisenstein, *The Printing Press as an Agent of Change*, Cambridge, Cambridge University Press, 1979.

²⁵ Les trois enquêtes agrégées ne sont pas identifiées par leur titre ; l'agrégat de 4 500 entreprises et le taux de 3,2 % n'ont pas pu être rapportés à une publication accessible. Références à compléter par les auteurs.

- Ethereum Foundation, « The Merge », fusion exécutée le 15 septembre 2022.
- Fortune Business Insights, *Artificial Intelligence Market Size, Share & Industry Analysis, 2025-2032*.
- K. Hu, « ChatGPT sets record for fastest-growing user base », *Reuters*, 2 février 2023.
- Insee, « Les technologies de l'information et de la communication dans les entreprises en 2024. Une entreprise sur dix déclare utiliser l'intelligence artificielle », *Insee Première*, n° 2061, juillet 2025.
- N. D. Kondratieff et W. F. Stolper, « The Long Waves in Economic Life », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 17, n° 6, 1935, p. 105-115.
- Y. LeCun, Y. Bengio et G. Hinton, « Deep learning », *Nature*, vol. 521, n° 7553, 2015, p. 436-444.
- McKinsey & Company, « The state of AI in early 2024: Gen AI adoption spikes and starts to generate value », 30 mai 2024.
- J. Mokyr, *The Lever of Riches*, Oxford, Oxford University Press, 1990.
- S. Nakamoto, *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*, 2008.
- J. Novet et al., « Tech megacaps plan to spend more than \$300 billion in 2025 as AI race intensifies », *CNBC*, 8 février 2025.
- OpenAI, « Introducing ChatGPT », 30 novembre 2022.
- Règlement (UE) 2023/1114 du Parlement européen et du Conseil du 31 mai 2023 sur les marchés de crypto-actifs.
- Règlement (UE) 2024/1689 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle.
- J. A. Schumpeter, *Capitalism, Socialism and Democracy*, New York, Harper & Brothers, 1942.
- Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence, *Artificial Intelligence Index Report 2024* et *Artificial Intelligence Index Report 2025*.