

Étude du cep

N° 6 | 2024

24 juillet 2024

L'environnement est relégué au second plan dans la stratégie numérique de l'UE

Une étude de cas sur les besoins énergétiques de l'IA générative et de l'euro numérique

Anselm Küsters, Anastasia Kotovskaia et Philipp Eckhardt



La « double transition » de la Commission, qui vise à instaurer une société à la fois plus verte et plus numérique, souffre d'un paradoxe : l'impact de la technologie numérique sur la durabilité est multiforme et donc difficile à prévoir. Cette étude du cep mène deux études de cas : l'une sur les modèles d'IA générative et l'autre sur l'euro numérique potentiel. Elle montre que leur impact environnemental peut remettre en question leur rôle de catalyseur de la double transition.

- ▶ Les premières données empiriques sur la consommation d'énergie des technologies d'IA générative suggèrent qu'elles entraîneront une augmentation des émissions de carbone. Les Européens pourraient émettre environ 14 720 tonnes de CO₂ par an en effectuant des recherches sur le web basées sur l'IA générative, ce qui équivaut à 38 272 vols entre Amsterdam et Rome. Toutefois, les prévisions concernant les effets de « rebond » sont incertaines et ne tiennent pas compte des scénarios contrefactuels et de la recherche sur l'amélioration de l'efficacité énergétique.
- ▶ Bien qu'il y ait beaucoup d'incertitudes quant à la durabilité d'un euro numérique, s'il est bien conçu, il pourrait être l'un des moyens de paiement les plus respectueux de l'environnement. Toutefois, de nombreux facteurs peuvent remettre en cause ce potentiel, par exemple le fait qu'il est censé être un moyen de paiement supplémentaire et qu'il sera émis en deux variantes.
- ▶ Comment les « jumeaux » peuvent-ils devenir amis ? Pour permettre une atténuation et un effet de levier mutuels, nous formulons plusieurs recommandations politiques horizontales qui vont au-delà de nos deux études de cas, en mettant l'accent sur l'amélioration des normes de transparence pour les émissions de carbone, les critères de taxonomie pour l'infrastructure numérique durable et une plus grande dépendance à l'égard du système européen d'échange de quotas d'émission. En outre, les développeurs d'IA devraient utiliser du matériel plus économe en énergie, développer de petits modèles de langage et adopter des pratiques de « codage vert ». Les émetteurs de monnaies numériques des banques centrales, comme l'euro numérique, devraient privilégier les solutions techniques centralisées par rapport aux solutions décentralisées de type Bitcoin. Enfin, il est essentiel de recourir aux sources d'énergie renouvelables, d'élaborer une stratégie fiable en matière de déchets électroniques et d'inclure des critères de durabilité dans les procédures de passation de marchés pour l'infrastructure de l'euro numérique.

Contenu

1	Introduction : Le paradoxe de la numérisation verte	5
2	Étude de cas 1 : Intelligence artificielle générative	10
2.1	Formation à l'IA.....	11
2.1.1	Croissance des ressources informatiques.....	12
2.1.2	Implications énergétiques.....	13
2.1.3	Le rôle des centres de données et de la fabrication de puces	14
2.1.4	Contre-effets.....	16
2.2	Inférence AI	19
2.2.1	Coûts d'inférence pour différentes tâches d'IA.....	19
2.2.2	Estimation de référence pour l'Europe.....	20
2.2.3	Contre-effets.....	21
2.3	Exigences légales et critères de mesure	21
2.3.1	Loi européenne sur l'IA	22
2.3.2	Différentes manières de mesurer l'impact environnemental de l'IA	23
2.4	Comment concevoir une transparence de l'IA générative qui soutienne la transition jumelle 24	
2.4.1	Niveau 1.....	25
2.4.2	Niveau 2.....	25
2.4.3	Niveau 3.....	26
3	Étude de cas n° 2 : l'euro numérique.....	28
3.1	Le projet Digital Euro	28
3.2	L'impact écologique des différents moyens de paiement	29
3.2.1	Billets de banque et pièces de monnaie ("espèces")	30
3.2.2	Paiements par carte de crédit.....	31
3.2.3	Les crypto-monnaies.....	31
3.2.4	Comparaison entre les différents moyens de paiement existants	32
3.3	Le développement durable est-il un facteur pour la BCE/UE/G7 lors de la création de l'euro numérique ?	34
3.3.1	Les intentions de la BCE	34
3.3.2	Les intentions de la Commission européenne.....	35
3.3.3	Les intentions du G7	36
3.4	Facteurs influençant l'empreinte écologique de l'euro numérique	37
3.4.1	Configuration technique	37
3.4.2	Source d'énergie.....	38
3.4.3	L'euro numérique comme moyen de paiement supplémentaire et les effets de substitution	38
3.4.4	Structure à deux niveaux ou à un niveau.....	39

3.4.5	Accès universel et accès restreint	39
3.4.6	Euro numérique en ligne ou hors ligne	40
3.4.7	Services frontaux pour l'euro numérique	41
3.4.8	Fonctionnalité de limite de maintien et de cascade (inversée)	41
3.4.9	Aspects liés à la sécurité et à la résilience	42
3.4.10	Programmabilité d'un euro numérique	42
3.4.11	Autres facteurs	43
3.5	Les nombreux défis et compromis de la transition jumelée dans la conception d'un euro numérique	43
4	Recommandations politiques	45
4.1	Recommandations horizontales	45
4.1.1	Normes de mesure des émissions de carbone de l'IA et des MNBC sur l'ensemble de leur cycle de vie	45
4.1.2	Critères taxonomiques pour une infrastructure numérique durable	46
4.1.3	Confiance dans le pouvoir des principaux instruments de la politique climatique de l'UE	47
4.2	Recommandations relatives à l'intelligence artificielle	47
4.2.1	Transparence accrue grâce à la mise en place d'une équipe restreinte, à la divulgation d'informations règles de divulgation et la concurrence	47
4.2.2	Analyse des données d'interaction	48
4.2.3	Interface numérique pour les comparaisons avec les consommateurs	48
4.2.4	Passage à des pratiques de "codage vert"	49
4.2.5	Recherche sur les puces efficaces, les petits modèles linguistiques et les scénarios d'émissions	50
4.2.6	Utiliser l'IA pour optimiser les processus internes de l'UE	50
4.3	Recommandations relatives à l'euro numérique	51
4.3.1	Avons-nous vraiment besoin d'un euro numérique ?	51
4.3.2	Avons-nous besoin d'un euro numérique en ligne et hors ligne ?	51
4.3.3	Choisir la bonne conception technique	52
4.3.4	Choisir les bonnes sources d'énergie pour alimenter l'écosystème de l'euro numérique	53
4.3.5	Réfléchir à une stratégie de gestion des déchets électroniques à l'épreuve du temps	54
4.3.6	Être transparent sur l'impact environnemental d'un euro numérique	54
5	Conclusion : Vers un avenir numérique respectueux de l'environnement	57

Chiffres

Fig. 1 :	Relations entre la numérisation, la durabilité et la réglementation	7
----------	---	---

Fig. 2 :	Cycle de vie abstrait d'un modèle d'IA	10
Fig. 3 :	Tendances de la croissance du calcul	13
Fig. 4 :	Émissions de onze modèles d'IA	14
Fig. 5 :	Demande d'énergie des centres de données.....	15
Fig. 6 :	Quantité moyenne d'émissions de carbone produites par des robots d'IA spécifiques pour 1 000 requêtes.....	20
Fig. 7 :	Une approche à trois niveaux pour conceptualiser et mesurer l'empreinte énergétique de la genAI	25
Fig. 8 :	Consommation d'énergie (en kWh) par transaction pour le traitement de base de certains systèmes de paiement	34

Tableaux

Tab. 1 :	Estimation de référence : Empreinte potentielle de l'inférence générative de l'IA en Europe	21
Tab. 2 :	Empreinte environnementale des billets de banque en euros par rapport à d'autres produits courants	30
Tab. 3 :	Consommation d'électricité par transaction.....	33
Tab. 4 :	Empreinte carbone d'un hypothétique euro numérique basé sur le TIPS	53

Boîtes

Encadré 1 :	Informations à fournir sur l'impact environnemental des crypto-actifs dans le cadre du MICA	47
-------------	---	----

1 Introduction : Le paradoxe de la numérisation verte

Historiquement, les processus de numérisation et de décarbonisation ont été inextricablement liés : par rapport au PIB, la production économique mondiale a diminué en termes de consommation d'énergie et augmenté en termes d'utilisation de l'information depuis 1913.¹ Toutefois, en raison de l'utilisation accrue des centres de données, des crypto-monnaies et de l'intelligence artificielle (IA), la demande mondiale d'électricité devrait doubler au cours des trois prochaines années.² Pourtant, le projet politique clé de la Commission sortante von der Leyen I, et de l'Union européenne (UE) plus généralement, a été d'initier une "double transition" visant à parvenir à une société à la fois plus verte et plus numérique. Cette démarche est compliquée par les récents changements géopolitiques, déclenchés par l'attaque de la Russie contre l'Ukraine et l'affirmation croissante de la Chine sur la scène commerciale internationale. Ces changements ont conduit à des appels pour que l'UE accroisse son "autonomie stratégique" et sa "souveraineté numérique",³ par exemple en développant des modèles d'IA nationaux. **La numérisation peut-elle jouer le rôle qui lui est promis dans le processus de décarbonisation ?**

Ce document vise à démystifier le récit d'une double transition : La numérisation et la durabilité sont des phénomènes généralement indépendants, mais l'un peut soutenir - ou contredire - l'autre. **L'utilisation de ce terme par la Commission fait référence à une série de mesures législatives et non législatives dans le cadre du marché vert européen et de la stratégie de la décennie numérique**, y compris, par exemple, le plan d'action pour l'économie circulaire et la stratégie numérique.⁴ Il est clair que ces deux domaines d'action sont fondamentaux pour favoriser une société européenne à la fois résiliente et capable d'une croissance durable. Selon le rapport "State of the Climate in Europe 2022", l'Europe se réchauffe deux fois plus que la moyenne mondiale depuis les années 1980, ce qui a des répercussions importantes sur le tissu socio-économique et les écosystèmes de la région.⁵ De même, la diffusion rapide des compétences, des infrastructures et des services numériques devient vitale pour maintenir la compétitivité industrielle, la création d'emplois et la résilience du continent, en particulier dans des secteurs stratégiques tels que l'IA générative, où les dépendances à haut risque doivent être évitées dans un contexte de fragilité mondiale croissante. En fait, la numérisation est souvent considérée comme un "catalyseur" non seulement pour une économie et une société européennes compétitives, mais aussi durables.⁶ Plusieurs documents de la Commission indiquent que "la transformation numérique devrait contribuer à une économie durable, neutre sur le plan climatique et efficace dans l'utilisation des ressources"⁷, y compris le livre blanc de la Commission sur la future loi sur les réseaux numériques.⁸ Les conclusions du Conseil sur l'avenir de la politique numérique de l'UE, approuvées le 21 mai 2024, soulignent que la transformation numérique devrait "aller de pair" avec la

¹ Fouquet (2024), La numérisation, la dématérialisation et la décarbonisation de l'économie mondiale en perspective historique : la relation entre l'énergie et l'information depuis 1850, [LSE Research Documents en ligne sur l'économie](#).

² Selon un nouveau rapport de l'AIE : [Electricity 2024 - Analysis and forecast to 2026 \(windows.net\)](#).

³ Pour une définition et une discussion de ce terme, voir : Steinbach (2023), [EU's Turn to 'Strategic Autonomy' : Leeway for Policy Action and Points of Conflict | European Journal of International Law | Oxford Academic \(oup.com\)](#).

⁴ Commission européenne (2019), Communication, Le Green Deal européen, COM/2019/640 final ; [Décennie numérique de l'Europe | Façonner l'avenir numérique de l'Europe \(europa.eu\)](#).

⁵ OMM (2023), État du climat en Europe 2022, OMM-No. 1320, [télécharger \(wmo.int\)](#).

⁶ CPE (2020), [Vers une économie européenne verte, compétitive et résiliente : comment la numérisation peut-elle aider ? \(epc.eu\)](#).

⁷ Selon le résumé du Service de recherche du Parlement européen : EPRS (2024), [La portée mondiale de l'approche de l'UE en matière de transformation numérique | Think Tank | Parlement européen \(europa.eu\)](#), p. 4.

⁸ Voir les chapitres 2.3.5 et 3.2.9 du livre blanc de la Commission européenne intitulé "Comment maîtriser les besoins de l'Europe en matière d'infrastructure numérique ?" [[COM\(2024\) 81](#), 21.2.2024, voir [cepcepPolicyBrief](#)].

transition verte.⁹ L'accélération de la mise en œuvre de la double transition devrait jouer un rôle important dans le prochain mandat de la Commission.¹⁰

Toutefois, il existe un **paradoxe sous-jacent au cœur de cette stratégie, car le rôle croissant des solutions numériques a un impact multiforme sur la durabilité environnementale, dont les canaux sont extrêmement difficiles à prévoir et à quantifier.** D'une part, les avancées technologiques contribuent indéniablement aux objectifs écologiques en optimisant l'utilisation des ressources, en améliorant les prévisions et en programmant l'offre et la demande d'énergie pour les énergies renouvelables. Par exemple, l'IA peut rendre le réseau électrique, sur lequel reposent les technologies numériques, plus rapide et plus résistant.¹¹ L'extension des technologies numériques à l'ensemble des secteurs pourrait représenter jusqu'à 20 % des réductions d'émissions requises d'ici à 2050.¹² En remédiant à certaines défaillances du marché qui entravent l'expansion des activités circulaires, les technologies numériques aident le secteur public à mettre en place de meilleures politiques d'économie circulaire, à remodeler l'interaction entre le gouvernement et les citoyens et à améliorer la mise en œuvre de ces politiques.¹³ D'un autre côté, les solutions numériques ont une empreinte carbone intrinsèque (en plus des risques plus généraux liés à la sécurité et à la vie privée, que nous omettons dans l'analyse suivante). La consommation d'énergie et les déchets électroniques associés à l'infrastructure numérique, y compris les centres de données, les modèles d'IA et les options de paiement numérique, nécessitent un examen critique. La figure 1 présente les relations pertinentes dans un diagramme, en mettant l'accent sur les données et l'énergie en tant que ressources, sur la numérisation et la durabilité en tant que principes, et sur la manière dont les infrastructures et les cadres réglementaires peuvent être reliés entre eux.

⁹ Conseil (2024), L'avenir de la politique numérique de l'UE, [Conclusions du Conseil](#) (21 mai 2024), n° 9484/24, p. 15. Le même sentiment se retrouve dans les conclusions du Conseil "Compétitivité" approuvées trois jours plus tard, qui envisagent une "industrie européenne compétitive, moteur de notre avenir vert, numérique et résilient".

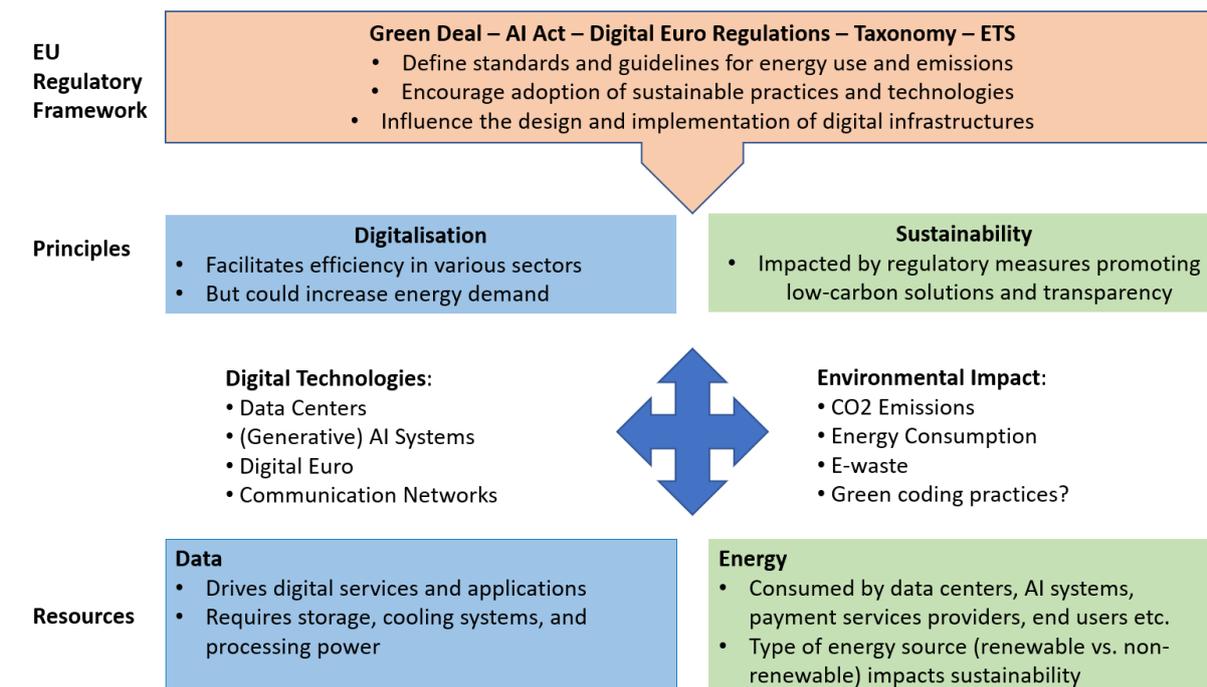
¹⁰ EPRS (2024), [Dix questions à suivre en 2024](#) pp. 7 et suivantes.

¹¹ Voir : Kim (2023), [Quatre façons dont l'IA rend le réseau électrique plus rapide et plus résistant | MIT Technology Review](#).

¹² Voir : WEF (2022), [Les technologies numériques peuvent réduire les émissions mondiales de 20 % \(weforum.org\)](#).

¹³ Barteková et Börkey (2022), "Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy", OECD Environment Working Papers, No. 192, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/6f6d18e7-en>.

Fig. 1: Relations entre la numérisation, la durabilité et la réglementation



Source : cep research.

Notre examen arrive à point nommé. Des chercheurs ont noté que "le rôle de l'IA dans les industries vertes reste relativement peu exploré", notamment en ce qui concerne la complémentarité et la "distance technique" entre les technologies numériques et les technologies vertes.¹⁴ Bien qu'optimistes quant aux avantages potentiels des outils pilotés par l'IA dans la lutte contre le changement climatique, les conseillers de l'ONU notent que "[n]ous devons également garder un œil sur l'impact négatif potentiel de l'IA sur le changement climatique en raison de la consommation d'énergie et d'eau qui y est associée".¹⁵ Dans la littérature sur l'apprentissage automatique, un article souvent cité de Timnit Gebru et de ses coauteurs, qui assimile les grands modèles de langage à des "perroquets stochastiques", affirme même que le déploiement de ces innovations numériques pourrait s'apparenter à une nouvelle forme de "racisme environnemental". Les auteurs utilisent cette expression pour souligner le fait que les effets négatifs du changement climatique touchent en premier lieu les communautés les plus marginalisées du monde, alors que ces communautés ne bénéficient généralement pas encore de l'essor de l'IA. Ils estiment que les décideurs politiques et les chercheurs devraient "donner la priorité à l'efficacité énergétique et aux coûts afin de réduire l'impact négatif sur l'environnement et l'accès inéquitable aux ressources".¹⁶ Dans l'ensemble, il est temps de se concentrer à la fois sur l'IA *pour la* durabilité (par exemple, les objectifs de développement durable) et sur la durabilité de l'IA elle-même (c'est-à-dire le développement et l'utilisation des systèmes d'IA).¹⁷

Les piliers vert et numérique de la double stratégie de transition de la Commission couvrent des projets nombreux et divers, allant de la modernisation des chemins de fer à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, en passant par l'administration en ligne et les services numériques. À titre

¹⁴ Khunakornbodintr (2024), [Examiner l'impact de la spécialisation technologique verte et de l'intégration des technologies de l'IA sur la performance de l'innovation verte : preuves de la Chine \(frontiersin.org\)](#). Cependant, le rapport "L'éthique des assistants IA avancés" publié par Google comprend un chapitre entier (chapitre 18) sur l'impact environnemental.

¹⁵ Organe consultatif de l'ONU sur l'IA (2023), Gouverner l'IA pour l'humanité, [rapport intermédiaire.pdf \(un.org\)](#), p. 4.

¹⁶ Bender et al. (2021), [On the Dangers of Stochastic Parrots | Proceedings of the 2021 ACM Conference](#).

¹⁷ van Wynsberghe, A. (2021), Sustainable AI : AI for sustainability and the sustainability of AI, *AI Ethics* 1, pp .213-218.

d'exemple, cette étude du cep réalise deux études de cas détaillées portant sur des technologies numériques qui ont pris une importance particulière au cours des derniers mois : les modèles d'IA générative, tels que distribués par OpenAI avec son service "ChatGPT" (section 2), et les monnaies numériques des banques centrales (MNBC), telles que le projet d'"euro numérique" avancé par la Commission et la BCE (section 3). Il est opportun de se pencher sur l'empreinte carbone inhérente à ces solutions numériques de premier plan, car elle remet en question leur rôle de catalyseur dans la réalisation des objectifs de durabilité. Nous formulons donc plusieurs recommandations politiques à l'intention de la prochaine Commission afin de garantir que la double transition puisse être gérée avec succès et ne soit pas intrinsèquement contradictoire (section 4). Notre conclusion se trouve à la section 5.

Pourquoi avons-nous choisi ces deux technologies, l'IA générative et l'euro numérique, pour nos études de cas ? Dans le cas de l'IA générative, ce choix s'explique par la conviction apparemment dominante chez les législateurs européens que l'IA produira des résultats bénéfiques pour l'environnement. Cela se reflète, par exemple, dans le considérant 4 de l'Acte sur l'IA de l'UE, qui stipule que l'IA peut soutenir des "résultats bénéfiques pour l'environnement", notamment "l'efficacité des ressources et de l'énergie, la surveillance de l'environnement, la conservation et la restauration de la biodiversité et des écosystèmes, ainsi que l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à ce dernier".¹⁸ Comme le montre notre analyse, cet optimisme ne tient pas compte de preuves empiriques essentielles et signifie que la loi sur l'IA pourrait ne pas tenir compte de manière adéquate des incidences de l'IA sur l'environnement. Dans le cas de l'euro numérique, notre choix se justifie par le fait que le législateur - le Parlement européen et le Conseil - et la Banque centrale européenne (BCE) sont actuellement en train de décider de la suite à donner au projet et de faire plusieurs choix de conception cruciaux qui auront un impact sur l'empreinte écologique future de la nouvelle MNBC (potentielle) de la zone euro. Il est donc opportun d'examiner de plus près ces décisions - par exemple la conception technique et les acteurs du marché impliqués - en particulier du point de vue de la durabilité.

Dans l'ensemble, cette **Étude du cep** appelle à une approche plus holistique et normalisée pour mesurer et comparer l'impact écologique de différentes solutions numériques, telles que l'IA générative et les MNBC. Le règlement de l'UE sur la taxonomie fixe des critères contraignants pour déterminer si une activité économique peut être considérée comme durable du point de vue de l'environnement, ce qui permet d'orienter les capitaux vers des activités économiques durables. L'inclusion du secteur des TIC dans cette taxonomie pourrait favoriser une transformation durable. De même, le système européen d'échange de quotas d'émission (SCEQE) contribue à orienter les économies vers la neutralité carbone en encourageant les solutions à haut rendement énergétique et à faible taux d'émission de carbone sans intervention politique supplémentaire. Plus précisément, il est essentiel de développer une terminologie, des normes et des protocoles communs pour mesurer les émissions de carbone des technologies numériques vertes tout au long de leur cycle de vie, y compris la formation à l'IA, la consommation de ressources naturelles et la prise en compte des effets de rebond. La méthodologie d'évaluation de l'impact net du carbone de la Coalition européenne pour un numérique vert devrait être étendue, par exemple par le biais de lignes directrices sectorielles sur l'IA et les MNBC. Une plus grande transparence par le biais d'un système de "red-teaming" de la durabilité et d'une concurrence axée sur les consommateurs est cruciale, mais elle nécessite une

¹⁸ Version finale, au moment de la rédaction : [CO_TA \(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip24_1111). Pour une discussion critique, voir : Warso et Shrishak (2024), [Hope : The AI Act's Approach to Address the Environmental Impact of AI | TechPolicy.Press](https://techpolicy.press/).

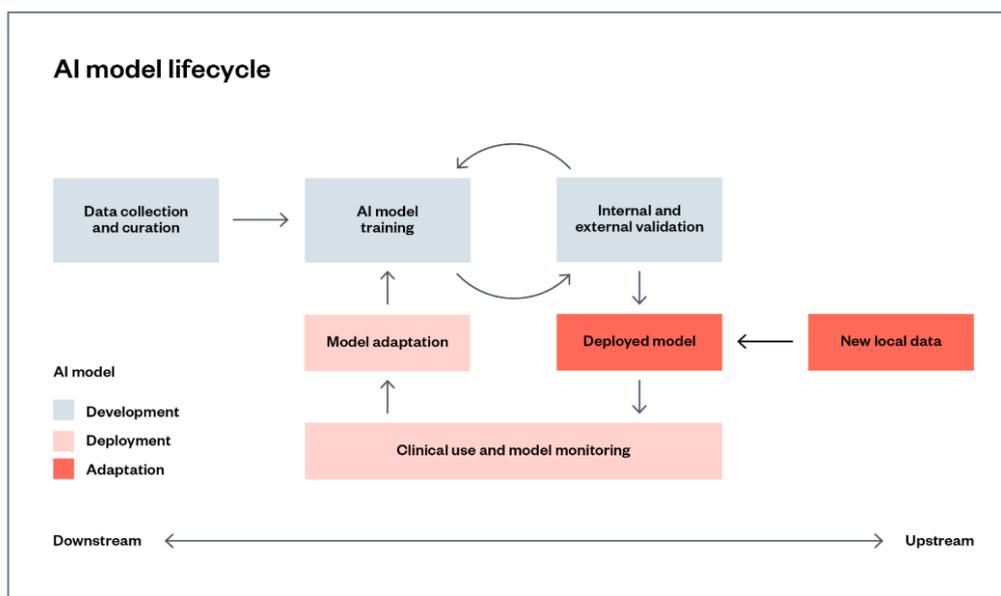
amélioration de la collecte systématique des données et des rapports publics. En outre, il est essentiel de promouvoir les pratiques de codage écologique, d'offrir des incitations financières pour le développement de logiciels efficaces et de soutenir la recherche sur le matériel d'IA économe en énergie et les petits modèles de langage, ainsi que d'utiliser l'IA pour optimiser les opérations internes de l'UE. Parallèlement, la conception technique d'un euro numérique devrait privilégier les solutions centralisées telles que les systèmes de règlement brut en temps réel (RBTR) afin de minimiser l'impact sur l'environnement. Le choix de sources d'énergie renouvelables pour l'écosystème de l'euro numérique et la mise en place d'une stratégie fiable en matière de déchets électroniques sont essentiels. La transparence sur l'impact environnemental de l'euro numérique devrait être assurée, en établissant une norme pour une divulgation plus poussée et un suivi continu. Des enseignements peuvent être tirés du règlement sur les marchés des crypto-actifs (MiCAR) en ce qui concerne les informations sur le développement durable, en veillant à ce que les empreintes environnementales de tous les instruments de paiement soient transparentes et comparables.

2 Étude de cas 1 : Intelligence artificielle générative

Au cours de l'année écoulée, la popularité croissante des produits d'IA commerciaux, tels que ChatGPT d'OpenAI, qui utilisent des modèles d'IA génératifs et multimodaux, a marqué un changement important dans l'approche de l'intégration de l'apprentissage automatique dans les applications technologiques. Ces modèles d'IA à usage général, connus sous le nom de "modèles de base", sont conçus pour fournir une solution unifiée à différentes tâches et promettent donc des avancées économiques et sociales significatives, à l'instar des technologies à usage général antérieures telles que la machine à vapeur ou l'électricité. En raison de leur rôle prépondérant dans le discours actuel sur la numérisation, y compris dans les priorités de la Commission européenne, ils font l'objet de l'étude de cas de la présente section.

Il est difficile d'attribuer la responsabilité des pratiques durables en ce qui concerne l'IA générative en raison de la multitude d'acteurs et des diverses sources de connaissances engagées dans le développement et le déploiement de ces modèles.¹⁹ Indépendamment de la complexité du modèle ou de l'approche du développement - qu'il soit codé en interne ou externalisé - les systèmes d'IA dépendent généralement de chaînes d'approvisionnement élaborées (figure 2). L'éventail des responsabilités assumées par les développeurs et les exécutants de l'IA couvre l'ensemble du cycle de vie du système, depuis la formulation initiale du problème et la gestion des données (y compris la collecte, l'étiquetage et le nettoyage des données) jusqu'à l'entraînement, l'essai et le déploiement final du modèle. Bien que certains développeurs puissent gérer ces processus entièrement au sein de leur organisation, il est courant que ces tâches soient réparties entre diverses entités. Cette structure de la chaîne d'approvisionnement de l'IA générative a entraîné certains problèmes conceptuels dans le processus de rédaction de la loi européenne sur l'IA, qui était initialement basée sur une vision linéaire trop simpliste de la chaîne de valeur de l'IA.²⁰

Fig. 2: Cycle de vie abstrait d'un modèle d'IA



¹⁹ Brown (2023), Allocating accountability in AI supply chains : a UK-centred regulatory perspective (Attribution de la responsabilité dans les chaînes d'approvisionnement de l'IA : une perspective réglementaire centrée sur le Royaume-Uni), [Institut Ada Lovelace](#).

²⁰ Engler et Renda (2022), [Réconcilier la chaîne de valeur de l'IA avec la loi européenne sur l'intelligence artificielle - CEPS](#).

Source : Brown (2023), Allocating accountability in AI supply chains : Brown (2023), Allocation de la responsabilité dans les chaînes d'approvisionnement en IA.

Pour comprendre l'impact environnemental des modèles d'IA modernes, qui résulte principalement de l'importante consommation d'énergie et des émissions de carbone associées pendant leur formation et leur fonctionnement, il est préférable de classer le cycle de vie des systèmes d'IA génératifs en deux étapes : L'apprentissage du modèle d'IA (2.1) et l'utilisation du modèle d'IA (2.2), également appelée "inférence" puisque le modèle déduit des résultats sur la base d'une entrée donnée. Jusqu'à présent, la recherche et les médias se sont concentrés sur la phase de formation des modèles de ML, principalement parce qu'il s'agit d'une partie plus tangible du cycle de vie du modèle, qui se déroule généralement sur une période de temps fixe et sur des instances informatiques dédiées. Toutefois, des articles récents ont commencé à s'intéresser également à la phase d'inférence qui, comme nous le verrons, est cruciale pour comprendre l'impact de l'IA générative sur l'ensemble de son cycle de vie, car de plus en plus de personnes commencent à utiliser des applications d'IA générative dans leur vie quotidienne. L'étude de cette littérature suggère que la prochaine mise en œuvre par l'UE de la loi sur l'IA, qui comprend des règles environnementales pour les modèles d'importance systémique, devrait prendre en compte l'ensemble de la durée d'exploitation lors de l'examen de l'empreinte environnementale de ces systèmes d'IA (2.3). Toutefois, cela pourrait poser des problèmes pour le plan de l'UE visant à accroître sa compétitivité et à attirer les jeunes pousses de l'IA, et serait également entravé par des problèmes méthodologiques, compte tenu de l'état actuel de la littérature. Nous proposons donc une approche à trois niveaux pour incorporer l'étalonnage de la durabilité de la genAI et conseillons de n'incorporer, pour l'instant, que le premier niveau de tout type de réglementation obligatoire (2.4).

Lorsque nous nous concentrons sur l'empreinte carbone de la formation et du déploiement de l'IA dans l'analyse qui suit, nous laissons délibérément de côté d'autres éléments pertinents du cycle de vie de cette technologie, depuis la collecte de données personnelles ou protégées par des droits d'auteur, l'extraction de minéraux de terres rares et l'étiquetage laborieux des données de formation par des travailleurs kenyans²¹ jusqu'à la mise au rebut des puces et la production d'émissions toxiques. Nous nous abstenons également de commenter les tendances négatives de la concentration croissante du marché le long de la chaîne de valeur de l'IA générative, car nous avons déjà abordé ce sujet ailleurs.²² Bien qu'importants, ces facteurs auraient été difficiles à quantifier dans la même mesure que la formation et le déploiement des modèles, pour lesquels nous disposons déjà de quelques résultats empiriques initiaux.

2.1 Formation à l'IA

Les progrès des technologies de l'intelligence artificielle, bien que bénéfiques, ont souvent des répercussions importantes sur l'environnement. Cela est dû à la **puissance de calcul, à l'énergie et aux ressources nécessaires à l'apprentissage de grands modèles**. Prenons l'exemple de l'empreinte carbone associée à BLOOM, un modèle de langage open-source très populaire qui compte 176 milliards de paramètres. Les résultats empiriques suggèrent que les émissions de CO₂eq résultant de

²¹ Perrigo (2023), [OpenAI a fait appel à des travailleurs kenyans pour moins de 2 dollars de l'heure : Exclusif | TIME](#).

²² Voir : Küsters et Kullas (2024), Competition in Generative Artificial Intelligence, [cepInput](#) N° 6. La centralisation des données, de la technologie et de l'infrastructure entre les mains de quelques entreprises dominantes complique encore ces questions. Voir : Küsters et Vöpel (2024), Weniger KI-Risiken durch mehr Wettbewerb (cepInput), [cep - Centrum für europäische Politik](#).

la phase d'apprentissage complet de BLOOM s'élève à environ 24,7 tonnes.²³ Ce chiffre atteint même 50,5 tonnes si l'on tient compte de tous les aspects pertinents, y compris la production d'équipements et la consommation totale d'énergie pendant les opérations. Au fil du temps, les besoins énergétiques des grands modèles linguistiques n'ont cessé d'augmenter. Les émissions totales estimées pour le modèle le plus récent de Meta, connu sous le nom de Llama 3, étaient de 2290 tCO₂eq.²⁴ La formation du GPT-4 a coûté 100 millions de dollars à OpenAI et a duré 100 jours, utilisant 25 000 GPU NVIDIA A100. Sur la base de ces informations, il a été estimé que GPT-4 a consommé entre 51 773 MWh et 62 319 MWh, soit plus de 40 fois la consommation de son prédécesseur, GPT-3.²⁵

2.1.1 Croissance des ressources informatiques

Pour les besoins du présent document, il convient de souligner que l'élément clé des progrès actuels en matière de performances et de généralité de l'IA est l'**augmentation exponentielle des ressources informatiques nécessaires pour former les modèles d'IA de pointe**. Les estimations suggèrent qu'environ deux tiers des améliorations des performances des modèles de langage au cours des dernières années peuvent être attribuées à l'augmentation de la taille des modèles.²⁶ Cette tendance souligne l'importance cruciale du suivi de la croissance des ressources informatiques, ou "compute", utilisées pour former ces modèles. Une analyse récente suggère que la croissance des ressources informatiques a quadruplé chaque année, reflétant une tendance cohérente dans les modèles les plus performants et les organisations d'IA de premier plan telles que OpenAI, Google DeepMind et Meta AI (figure 3).²⁷

²³ Luccioni et al. (2022), [2211.02001] Estimation de l'empreinte carbone de BLOOM, un modèle linguistique à 176 paramètres (arxiv.org).

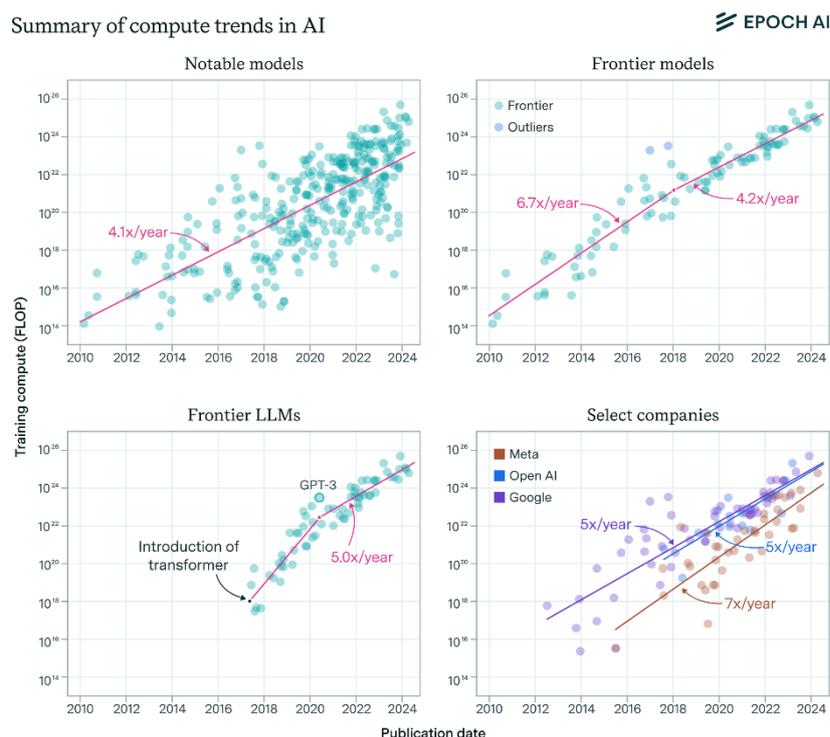
²⁴ Voir les informations sur Hugging Face : meta-llama/Meta-Llama-3-70B - Visage câlin.

²⁵ Numenta (2023), AI is harming our planet : addressing AI's staggering energy cost (2023 update) (numenta.com).

²⁶ Ho et al. (2024), Algorithmic progress in language models. ArXiv [cs.CL], arXiv. <https://arxiv.org/abs/2403.05812>.

²⁷ Sevilla et Roldán (2024), Training Compute of Frontier AI Models Grows by 4-5x per Year. Extrait de : <https://epochai.org/blog/training-compute-of-frontier-ai-models-grows-by-4-5x-per-year> [ressource en ligne].

Fig. 3: Tendances de la croissance de l'informatique



Source : Sevilla et Roldán (2024), "Training Compute" : Sevilla et Roldán (2024), "Training Compute". Pour une référence complète, voir la note de bas de page.

Certains modèles linguistiques d'avant-garde ont connu une croissance encore plus rapide, jusqu'à 9 fois par an entre 2017 et 2024 (figure 3). Bien qu'il puisse y avoir des périodes de ralentissement dues à des goulets d'étranglement technologiques ou opérationnels, la demande de puissance de calcul continue à augmenter. Les plus grands modèles actuels, tels que GPT-4 et Gemini Ultra, illustrent les limites supérieures des capacités actuelles de l'IA, étant formés sur une échelle de calcul (FLOPS) bien plus grande que celle de leurs prédécesseurs. Les projections basées sur les taux de croissance historiques correspondent étroitement à la puissance de calcul réelle de ces modèles.²⁸ Comme le montrent clairement ces estimations, les coûts environnementaux associés à une utilisation aussi intensive des ressources informatiques exigent une approche équilibrée du développement futur de l'IA, qui tienne compte de la nécessité d'adopter des pratiques durables de manière empirique et structurée.

2.1.2 Implications énergétiques

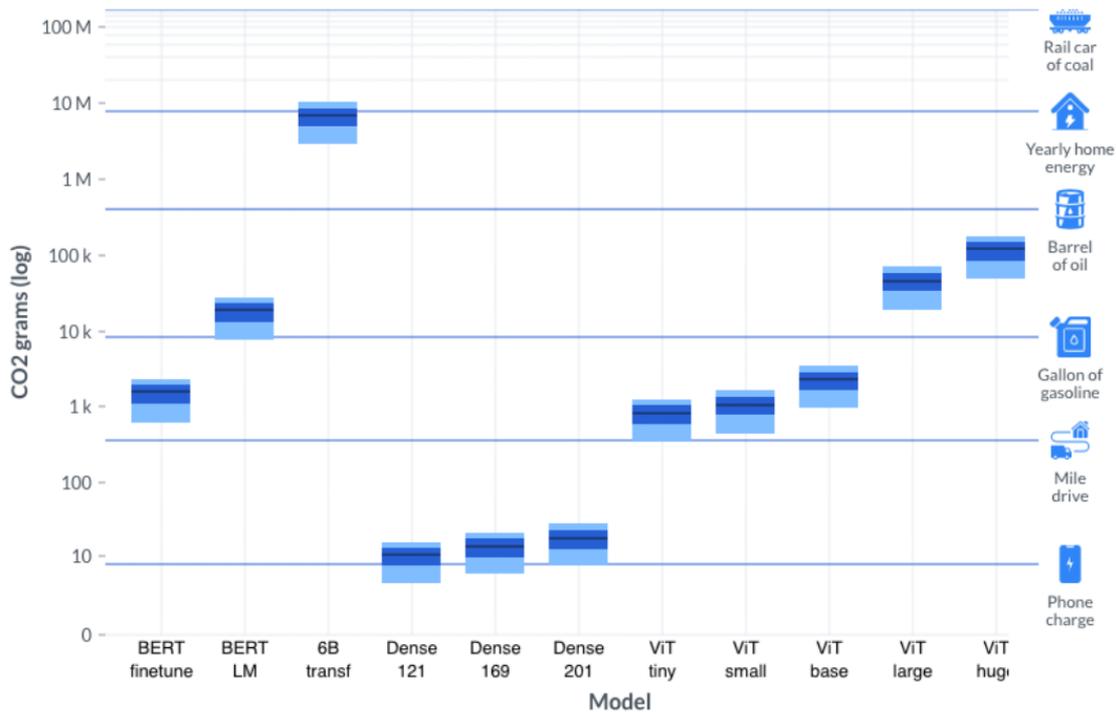
Les preuves empiriques des implications énergétiques de cette tendance à l'échelle proviennent d'une étude récente de Dodge et al. (2022), qui présentent un cadre pour l'évaluation de l'empreinte carbone des opérations logicielles, en se concentrant sur l'utilisation de données en temps réel et géographiquement spécifiques pour calculer les émissions marginales par unité d'énergie consommée.²⁹ L'étude évalue l'intensité carbone opérationnelle de divers modèles d'IA modernes sur un spectre de tailles allant jusqu'à un modèle de langage partiellement entraîné de 6,1 milliards de

²⁸ Sevilla et al. (2022), Compute Trends Across Three Eras of Machine Learning, 2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Padoue, Italie, pp. 1-8.

²⁹ Dodge et al. (2022), [Measuring the Carbon Intensity of AI in Cloud Instances | Proceedings of the 2022 ACM Conference](#).

paramètres. En outre, l'étude contextualise ces émissions en les comparant aux activités et consommables quotidiens. Les résultats montrent clairement que les modèles de calcul à grande échelle, tels que celui qui sous-tend ChatGPT, ont un impact environnemental substantiel (figure 4).

Fig. 4: Émissions de onze modèles d'IA



Source : Dodge et al : Dodge et al. (2022), Measuring the Carbon Intensity of AI in Cloud Instances.

Par exemple, la formation partielle d'un "transformateur" de 6,1 milliards de paramètres (une architecture d'IA couramment utilisée pour les grands modèles de langage d'aujourd'hui) dépasse potentiellement les émissions annuelles de CO₂ d'un ménage américain moyen, même lorsqu'il n'est formé qu'à 13 %. De même, Li et al. (2023) fournissent une méthode d'estimation de l'empreinte hydrique des modèles d'IA, soulignant la nécessité de prendre en compte l'empreinte hydrique de manière holistique, ainsi que l'empreinte carbone, pour permettre une formation à l'IA véritablement durable.³⁰ Dans l'ensemble, ces données empiriques suggèrent que des pratiques économes en énergie devraient être intégrées dans les processus de formation des grands modèles de genAI afin d'atténuer autant que possible leur impact sur l'environnement. Toutefois, comme le montre le rôle des centres de données et de la fabrication de puces dans cette formation, ce n'est pas aussi facile qu'il n'y paraît.

2.1.3 Le rôle des centres de données et de la fabrication de puces

Malgré des investissements importants dans les énergies renouvelables, les entreprises Big Tech comme Meta, Google et Microsoft - toutes connues pour former de grands modèles de langage - ont continué à enregistrer des émissions globales en hausse depuis que le dernier boom de la genAI a commencé en 2022. De juillet 2022 à fin juin 2023, la formation de Microsoft liée à l'IA a entraîné 15,4 millions de tonnes métriques d'équivalents CO₂, ce qui va à l'encontre du plan de l'entreprise visant à

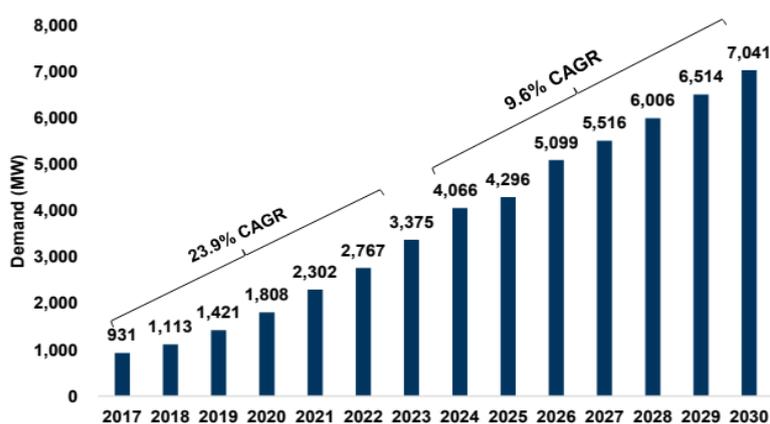
³⁰ Li et al. (2023), [Rendre l'IA moins "assoiffée" : Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models \(arxiv.org\)](https://arxiv.org/abs/2308.12321).

devenir neutre en carbone d'ici 2030.³¹ L'augmentation continue des émissions s'explique notamment par la demande énergétique des centres de données, qui peuvent consommer jusqu'à 200 fois plus d'électricité que des espaces de bureaux standard.³² Une grande partie de l'électricité de Microsoft est utilisée pour alimenter ses centres de données, dont la consommation a explosé, passant de 11 284 à 24 008 gigawattheures en trois ans.³³ De même, les émissions de Google ont augmenté de 48 % au cours des cinq dernières années, en grande partie à cause de la forte demande en énergie de l'IA et des centres de données, ce qui met en péril ses objectifs de réduction de l'empreinte climatique.³⁴ Bien que les prévisions de Goldman Sachs suggèrent que le groupe de la demande d'énergie des centres de données ralentit, passant d'environ 23,9 % par an à 9,8 % par an, **les données suggèrent encore une croissance rapide dans un avenir proche** (figure 5).

Fig. 5: Demande d'énergie des centres de données

Exhibit 4: Dominion's forecast of load from data centers indicates that the rapid growth it has seen will not slow down for the foreseeable future

Dominion 15-year data center forecast



Source: PJM, Data compiled by Goldman Sachs Global Investment Research, Company data

Source : Comme indiqué dans la figure.

En outre, **ces centres de données utilisent généralement d'importantes quantités d'eau pour le refroidissement**. Cette demande devrait également augmenter car les technologies de l'IA, qui nécessitent des unités de traitement graphique (GPU) puissantes pour fonctionner, ont besoin d'un refroidissement plus important que les serveurs traditionnels. Par exemple, il est probable que l'entraînement du GPT-3 dans les centres de données de pointe de Microsoft ait entraîné l'évaporation de 700 000 litres d'eau douce propre.³⁵ En 2022, Microsoft a connu une augmentation de 34 % de sa

³¹ Mantel (2024), [Microsoft : KI lässt Emissionen um bis zu 40 Prozent steigen | heise online](#).

³² Arcieri (2022), [centres de données Les demandes de , S&P Global Market Intelligence](#).

³³ Mantel (2024), [Microsoft : KI lässt Emissionen um bis zu 40 Prozent steigen | heise online](#).

³⁴ Milmo (2024), [Les émissions de Google augmentent de près de 50 % en cinq ans en raison de la demande d'énergie de l'IA | The Guardian](#).

³⁵ Li et al. (2023), [Rendre l'IA moins "assoiffée" : Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models \(arxiv.org\)](#).

consommation d'eau, qui a été attribuée à l'accent mis par l'entreprise sur la genAI.³⁶ Dans l'ensemble, la consommation d'eau de l'entreprise est passée d'un peu moins de 4,2 millions à plus de 7,8 millions de mètres cubes depuis 2020.³⁷ Selon des estimations récentes, la demande mondiale en matière d'IA pourrait être responsable de 4,2 à 6,6 milliards de mètres cubes de prélèvement d'eau en 2027, soit plus que le prélèvement annuel total de la moitié du Royaume-Uni.³⁸

Outre les coûts en énergie et en eau liés à l'entraînement des modèles d'IA et à l'hébergement des serveurs, la fabrication des puces augmente encore l'empreinte de la genAI, car la production de chaque génération successive de semi-conducteurs implique également des niveaux plus élevés de consommation d'énergie et d'eau, ainsi que d'émissions de gaz à effet de serre.³⁹ Malgré les progrès des algorithmes, des logiciels et du matériel qui améliorent l'efficacité énergétique et les performances (voir notre analyse ci-dessous), l'empreinte carbone totale des systèmes informatiques continue d'augmenter, principalement en raison des émissions provenant de la fabrication du matériel et de l'infrastructure.⁴⁰ Cette question a été négligée au profit de la sécurité de l'approvisionnement, en particulier en Europe, qui détient actuellement une petite part de la production mondiale, mais qui devrait augmenter sa part dans le cadre de la loi sur les puces de l'UE, ce qui pourrait entraîner une augmentation spectaculaire des émissions. **Si l'EU Chips Act atteint son objectif de 20% de production mondiale d'ici à 2030, les émissions liées à la fabrication de semi-conducteurs devraient au moins quadrupler.** Selon une étude récente, ces émissions pourraient passer de 38,91 MMTCE (millions de tonnes métriques d'équivalents carbone) à plus de 100 MMTCE d'ici à 2030, même en cas d'utilisation accrue des énergies renouvelables.⁴¹

2.1.4 Contre-effets

En réponse à ces développements, certaines start-ups reconsidèrent maintenant la domination des GPU conventionnels et recherchent un changement de paradigme dans l'infrastructure de calcul. Nous souhaitons ici mettre l'accent sur trois domaines prometteurs de la recherche actuelle.⁴² Premièrement, les unités de traitement stochastiques (SPU) utilisent les propriétés thermodynamiques pour effectuer des calculs par le biais de fluctuations aléatoires au sein des circuits, offrant ainsi une nouvelle approche particulièrement adaptée aux algorithmes d'intelligence artificielle traitant de l'incertitude. Deuxièmement, certaines jeunes entreprises intègrent de manière ambitieuse l'informatique neuronale à des puces thermodynamiques analogiques, en s'inspirant de l'informatique quantique. Enfin, d'autres espèrent révolutionner le domaine en développant des puces réversibles, une technologie économe en énergie qui préserve les informations pendant les calculs.⁴³ Dans l'ensemble, cette évolution bienvenue vers des méthodes de calcul alternatives reflète un consensus croissant sur la nécessité de transcender les limites de la loi de Moore et de la conception conventionnelle des puces, étant donné que les modèles d'IA dépassent rapidement les capacités

³⁶ Moss (2023), [La consommation d'eau de Microsoft fait un bond de 34 % en raison du boom de l'IA - DCD \(datacenterdynamics.com\)](#).

³⁷ Mantel (2024), [Microsoft : KI lässt Emissionen um bis zu 40 Prozent steigen | heise online](#).

³⁸ Li et al. (2023), [Rendre l'IA moins "assoiffée" : Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models \(arxiv.org\)](#).

³⁹ Crawford et al. (2021), [L'industrie des puces a un problème avec son empreinte carbone géante - Bloomberg](#).

⁴⁰ Gupta et al. (2020), Chasing Carbon : The Elusive Environmental Footprint of Computing, [2011.02839 \(arxiv.org\)](#).

⁴¹ Hess (2024), [L'empreinte écologique de la production de chips : Mapping Climate and Environmental Impact \(interface-eu.org\)](#).

⁴² Voir l'aperçu fourni par Knight (2024), [du ChatGPT La soif d'énergie](#).

⁴³ Sur l'informatique réversible, voir aussi : Azhar et Galbraith (2024), [Breaking the energy barrier with reversible computing \(exponentialview.co\)](#).

matérielles existantes. Cette évolution technologique, tout en remettant en cause des pratiques industrielles bien ancrées, promet d'importantes récompenses en termes de durabilité, mais nécessite davantage de financement et de certitude économique pour atteindre le marché et prendra beaucoup de temps pour arriver à maturité.

Malgré ces chiffres apparemment élevés et le long chemin que la recherche doit encore parcourir, il convient de souligner que, **d'un point de vue global, l'IA en tant que telle est loin de modifier l'environnement de manière significative**. Ces dernières années, les centres de données en nuage et à grande échelle ont représenté 0,1 à 0,2 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, et on estime qu'un quart de leur charge de travail et de leur trafic est actuellement lié à l'IA.⁴⁴ En 2023, les processeurs d'IA consommeront probablement entre 7 et 11 térawattheures (TWh) d'électricité par an, soit environ 0,04 % de la consommation mondiale d'électricité, mais à titre de comparaison, cette consommation est nettement inférieure à celle du minage de crypto-monnaies, qui utilise 100 à 150 TWh par an, et à celle des centres de données traditionnels, qui consomment 500 à 700 TWh.⁴⁵ On pourrait donc affirmer que le coût énergétique de la formation initiale est fondamentalement négligeable, surtout s'il n'est utilisé qu'occasionnellement pour de très grands modèles avancés qui sont ensuite utilisés par de nombreuses personnes et entreprises dans le monde entier. Dans un tel contexte, les coûts fixes initiaux élevés en termes d'énergie seraient rapidement récupérés. Ce qui est alarmant dans ce contexte, c'est **que les modèles d'IA générative ne sont pas seulement de plus en plus grands, mais qu'ils sont de plus en plus nombreux à être formés chaque année**, au lieu d'être de moins en moins nombreux : En 2023, un total de 149 modèles de fondation ont été publiés, soit plus du double de la quantité publiée en 2022.⁴⁶ Plutôt que de se concentrer sur un seul modèle, le nombre de fournisseurs augmente et, dans le même temps, la demi-vie des modèles en termes de capacités diminue, ce qui signifie que les nouvelles formations doivent être effectuées de plus en plus rapidement. Néanmoins, compte tenu des chiffres cités ci-dessus, les données et les projections actuelles suggèrent qu'il est peu probable que la formation à l'IA *seule* entraîne directement des augmentations importantes et à court terme des émissions de gaz à effet de serre.

Enfin, il convient de souligner que les prévisions actuelles peuvent être erronées. Un rapport du Center for Data Innovation (Centre pour l'innovation des données) souligne que "comme pour les technologies passées, de nombreuses affirmations initiales concernant la consommation d'énergie par l'IA se sont révélées exagérées et trompeuses".⁴⁷ L'auteur du rapport souligne que **la viabilité économique, les progrès technologiques et les améliorations de l'efficacité sont les principaux facteurs expliquant les inexactitudes passées des prévisions énergétiques de l'IA**. Tout d'abord, les prévisions exagérées négligent souvent les implications financières significatives de l'extension de l'infrastructure de l'IA, telles que les coûts prohibitifs associés à l'expansion des centres de données et à l'acquisition de matériel informatique de pointe. En outre, les rendements décroissants des améliorations des performances de l'IA indiquent une évolution vers l'optimisation plutôt que vers la croissance brute des calculs, reconnaissant ainsi l'approche d'un plateau dans certains domaines de la capacité de l'IA. Enfin, les tendances actuelles en matière d'intensité énergétique des centres de données, ainsi que les progrès réalisés dans la spécialisation du matériel et les techniques logicielles

⁴⁴ Kaack et al. (2021), [Aligner l'intelligence artificielle sur l'atténuation du changement climatique \(hal.science\)](#), p. 5.

⁴⁵ Données citées après : Luers et al. (2024), [L'IA va-t-elle accélérer ou retarder la course vers des émissions nettes nulles ? \(nature.com\)](#).

⁴⁶ HAI (2024), [HAI 2024 AI-Index-Report.pdf \(stanford.edu\)](#).

⁴⁷ Castro (2024), [Repenser les préoccupations relatives à la consommation d'énergie de l'IA \(datainnovation.org\)](#).

telles que la quantification,⁴⁸ suggèrent une voie durable pour l'avenir. Bien que l'avenir de l'innovation technologique (et en particulier le rythme des progrès) soit en fin de compte inconnaissable, il est important de garder ces facteurs à l'esprit lorsque l'on discute des demandes énergétiques probables de l'IA générative.

Un bon exemple de la rapidité avec laquelle les **progrès de la recherche sur l'architecture de l'IA pourraient modifier les prévisions actuelles sur les besoins énergétiques de la formation générative de l'IA** est la recherche récente de Microsoft, qui montre que les LLM à 1 bit sont plus efficaces que les systèmes traditionnels.⁴⁹ Ces modèles, où chaque paramètre est simplifié à un état ternaire (-1, 0, 1), montrent qu'il est possible de réduire considérablement la consommation d'énergie - jusqu'à 98 % - par rapport aux LLM traditionnels. En outre, ces modèles améliorent le temps de latence jusqu'à 310 %, ce qui permet d'obtenir des réponses plus rapides, essentielles pour les applications en temps réel, et consomment jusqu'à 85 % de mémoire en moins, ce qui permet de maintenir la qualité des performances tout en étant nettement plus économe en ressources. En outre, l'introduction de modèles de langage plus petits mais efficaces, tels que le Phi-3-mini de Microsoft et l'OpenELM d'Apple, montre que cette **tendance vers des modèles plus petits et plus "verts" mais (à peu près) aussi efficaces** va souvent de pair avec la démocratisation des technologies de l'IA.⁵⁰ Ces modèles sont conçus pour fonctionner efficacement sur du matériel moins puissant, comme les smartphones et les ordinateurs portables. Phi-3-mini, avec ses 3,8 milliards de paramètres, peut fonctionner sur du matériel GPU grand public, ce qui constitue un pas en avant vers l'introduction d'applications d'IA robustes sur des appareils de tous les jours (tels que les iPhones) sans dépendre de la connectivité au nuage.⁵¹ OpenELM, quant à lui, ne se contente pas d'améliorer l'efficacité des modèles de langage, mais favorise également la transparence en mettant à la disposition du public l'ensemble du cadre de formation et d'évaluation.⁵² Cette approche permet à la communauté de la recherche ouverte de reproduire et d'améliorer les travaux existants, ce qui est certainement essentiel pour favoriser l'innovation verte dans les technologies de l'IA.

Dans l'ensemble, ces développements soulignent la nécessité de soutenir la recherche et le développement en matière d'intelligence artificielle en donnant la priorité à l'efficacité et à l'accessibilité. Il est essentiel d'investir dans des technologies telles que les LLM à 1 bit et de soutenir les initiatives de recherche ouverte pour que les progrès de l'IA n'aient pas d'incidences négatives sur l'environnement, d'autant plus que l'évolution vers des modèles pouvant fonctionner sur des appareils grand public conduira à l'intégration de l'IA dans divers secteurs commerciaux. Par exemple, la collecte et le traitement des données ainsi que la publicité ciblée par l'IA contribuent de manière significative à la consommation d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre, ce qui aggrave l'empreinte environnementale de l'écosystème de la publicité numérique.⁵³ Pour atténuer ces effets négatifs, la recherche doit mettre au point **un nouveau paradigme informatique qui permette aux entreprises**

⁴⁸ Le terme quantification fait référence aux techniques qui réduisent la précision des poids et/ou des activations du modèle afin d'améliorer l'efficacité du calcul et de réduire les besoins en mémoire ou l'utilisation. Voir : Jacob et al. (2017), [Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference \(arxiv.org\) \(Quantification et formation de réseaux neuronaux pour une inférence efficace basée sur l'arithmétique des nombres entiers\)](#).

⁴⁹ Ma et al. (2024), [L'ère des LLM à 1 bit : All Large Language Models are in 1.58 Bits \(arxiv.org\)](#).

⁵⁰ Voir : Edwards (2024), [Microsoft's Phi-3 shows the surprising power of small, locally run AI language models | Ars Technica](#).

⁵¹ Abdin et al. (2024), [Phi-3 Technical Report : A Highly Capable Language Model Locally on Your Phone \(arxiv.org\)](#).

⁵² Mehta et al. (2024), [OpenELM : An Efficient Language Model Family with Open-source Training and Inference Framework \(arxiv.org\)](#).

⁵³ Marken et al. (2024), [La \(non-\)durabilité de l'intelligence artificielle dans le marketing en ligne \(ioew.de\)](#).

d'aligner leurs efforts de numérisation sur leurs objectifs environnementaux d'une manière bien meilleure que l'état actuel des connaissances en matière de formation à l'IA.

2.2 Inférence de l'IA

Même après qu'un modèle a été entraîné, il a toujours une empreinte carbone quotidienne due à l'électricité nécessaire pour le faire fonctionner (ce que l'on appelle "l'inférence"). En raison du succès rapide qu'il a connu dès son lancement, ChatGPT pourrait avoir consommé autant d'électricité que 175 000 personnes au cours du seul mois de janvier 2023.⁵⁴ Selon des recherches récentes, ChatGPT a besoin de 500 ml d'eau pour chaque 20 à 50 questions auxquelles il répond.⁵⁵ À mesure que l'IA générative gagne en importance, ce problème va s'aggraver. Une étude réalisée par Alex de Vries, un scientifique des données de la Banque centrale néerlandaise, prévoit que d'ici 2027, les serveurs d'IA pourraient utiliser entre 85 et 134 térawattheures (TWh) d'électricité chaque année dans le cadre d'un scénario modéré.⁵⁶ Cette quantité équivaut à peu près à 0,5 % de la consommation totale actuelle d'électricité dans le monde, ou à la consommation annuelle d'électricité de pays plus petits comme les Pays-Bas, l'Argentine ou la Suède. M. De Vries fonde ses conclusions sur les prévisions de croissance et d'efficacité énergétique des serveurs d'IA. Il note que la **demande énergétique des serveurs d'IA augmente plus rapidement que les améliorations de l'efficacité énergétique de l'IA**. Cette augmentation est attribuée à la complexité croissante des algorithmes d'IA, qui nécessitent un matériel plus puissant et plus gourmand en énergie pour fonctionner. Les LLM étant de plus en plus souvent intégrés dans des produits tels que les ordinateurs Microsoft ou les iPhones, il est donc essentiel d'acquérir une compréhension plus systématique des coûts énergétiques associés à l'inférence.

2.2.1 Coûts d'inférence pour différentes tâches d'intelligence artificielle

Une étude récente de Luccioni et al. (2023) présente la première comparaison complète des coûts d'inférence continus pour différents types de systèmes d'IA générative.⁵⁷ Elle inclut à la fois des modèles spécifiques à une tâche (conçus pour une seule tâche) et des modèles à usage général (capables de réaliser plusieurs tâches). L'évaluation se concentre sur l'empreinte énergétique et carbone nécessaire pour effectuer 1 000 inférences sur un ensemble de données de référence standard. Les résultats révèlent que les **modèles génératifs polyvalents consomment beaucoup plus de ressources que les modèles spécifiques à une tâche**, même en tenant compte de la taille du modèle (figure 6). En outre, l'analyse révèle une variabilité substantielle dans l'utilisation des ressources au sein des tâches et entre elles, en particulier entre les tâches impliquant différents types de données (comme le texte et les images). L'étude souligne que les tâches combinant des entrées d'images et de texte afin de produire des résultats catégoriels sont moins gourmandes en énergie et en carbone que les tâches générant du texte ou des images. Cette différenciation pourrait être cruciale, mais le discours politique sur l'IA et la durabilité n'a pas encore reflété cette conclusion.

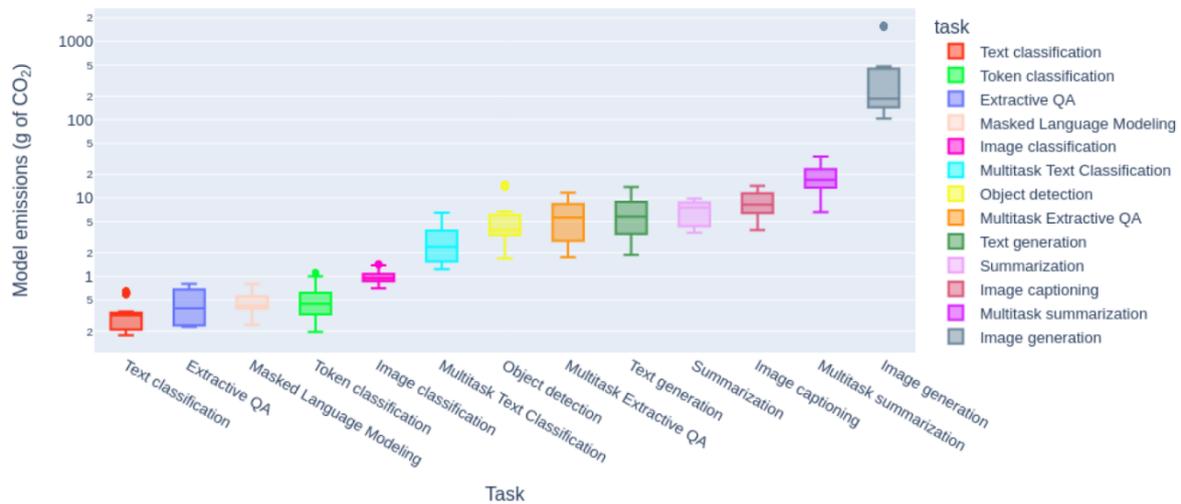
⁵⁴ Ludvigsen (2023), [ChatGPT La consommation d'électricité de](#).

⁵⁵ Li et al. (2023), [Rendre l'IA moins "assoiffée" : Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models \(arxiv.org\)](#).

⁵⁶ de Vries (2023), [L'empreinte énergétique croissante de l'intelligence artificielle : Joule \(cell.m\)](#).

⁵⁷ Luccioni et al. (2023), [Power Hungry Processing : Watts Driving the Cost of AI Deployment ? \(arxiv.org\)](#).

Fig. 6: Quantité moyenne d'émissions de carbone produites par des robots d'IA spécifiques pour 1 000 requêtes



Source : Luccioni et al. (2023), Power Hungry Processing.

2.2.2 Estimation de référence pour l'Europe

Pour obtenir une **estimation** approximative **des émissions futures liées à l'utilisation des LLM en Europe**, nous avons réalisé l'expérience de pensée suivante : Si des millions d'Européens accèdent à des services tels que ChatGPT plusieurs fois par jour, cela pourrait facilement représenter une consommation d'énergie importante. Quelle quantité ? OpenAI n'a pas publié de chiffres exacts sur le nombre de requêtes qu'elle reçoit chaque jour de la part de clients européens.⁵⁸ Si la prédiction de certains experts est exacte et que les LLM provoquent effectivement un "changement de plateforme" en remplaçant les moteurs de recherche, il serait logique d'aligner le nombre d'utilisateurs actuels de ChatGPT en Europe sur celui de Google. Cette hypothèse n'est pas déraisonnable : Actuellement, 22 % des personnes utilisent déjà ChatGPT comme alternative à Google.⁵⁹ Une enquête menée auprès d'Européens a révélé que la grande majorité des personnes interrogées utilisent Google plus de trois fois par jour pour effectuer des recherches en ligne.⁶⁰ Si, à l'avenir, ces questions sont posées à un service basé sur la genAI, tel que ChatGPT, au lieu de Google, cela se traduirait par au moins 490,56 milliards de requêtes en Europe par an (448 millions de personnes vivant dans l'UE × 365 jours × 3 requêtes/jour = 490,56 milliards de requêtes par an). Nous ne connaissons pas non plus la consommation d'énergie exacte de ChatGPT par requête. Toutefois, d'après l'article susmentionné de Luccioni et al. (2023), nous pouvons constater que BLOOM consomme environ 20 à 30 gCO₂ pour 1 000 requêtes. Étant donné que BLOOM est beaucoup plus petit que GPT4, la multiplication des coûts énergétiques des requêtes BLOOM avec les chiffres probables pour l'utilisation de ChatGPT conduit à une estimation très prudente, même en utilisant les chiffres supérieurs (tableau 1). Sur cette base, nous estimons que dans un avenir dominé par l'IA, les Européens pourraient émettre environ **14 720 tonnes de CO₂ par an en effectuant des recherches sur le web basées sur l'IA générative**. À titre de comparaison, cela équivaut aux émissions causées par 38 272 vols en classe économique entre

⁵⁸ Selon une déclaration de Sam Altman en février 2024, les utilisateurs de ChatGPT génèrent 100 milliards de mots par jour. Voir : Altman (2024), [Les utilisateurs de ChatGPT génèrent 100 milliards de mots par jour - Sam Altman : r/OpenAI \(reddit.com\)](#).

⁵⁹ Voir : SRI/PEARL (2024), [La nouvelle enquête SRI/PEARL, qui vient d'être publiée, révèle l'opinion publique mondiale sur l'IA](#).

⁶⁰ Voir : Ray (2019), [Nous avons interrogé 1 400 internautes sur Google - Voici ce que nous avons appris - Moz](#).

Amsterdam et Rome.⁶¹ Sur la base des dernières données pour 2022,⁶² où les émissions totales de CO₂ en Europe (UE-27) sont de 2 485 814,43 kilotonnes (ou 2,485 milliards de tonnes), les émissions de CO₂ dues aux recherches web basées sur l'IA générative (14 720 tonnes par an) prévues par notre estimation représenteraient au moins 0,06 % des émissions totales de CO₂ en Europe.

Tab. 1: Estimation de référence : Empreinte potentielle de l'inférence générative de l'IA en Europe

Étape de calcul	Valeur/Description
Total des requêtes annuelles en Europe	448 millions de personnes vivant en Europe × 365 jours × 3 requêtes/jour = 490,56 milliards de requêtes/an
Consommation de CO ₂ pour 1000 requêtes	Littérature : 20-30 gCO ₂ pour 1000 requêtes (BLOOM) Hypothèse : 30 gCO ₂ pour 1000 requêtes (ChatGPT)
Émissions totales de CO ₂ par an	490,56 milliards de requêtes × gCO ₂ estimé pour 1000 requêtes = 14 716,8 tonnes de CO₂ par an

Source : Estimation propre. La méthodologie suit une idée proposée par : Lynn Kaack (2024), Présentation "Input und Q&A : Den ökologischen Fußabdruck von Basismodellen messen", at : Conférence "KI : Immer größer statt grüner", Berlin (29.01.2024).

2.2.3 Contre-effets

Se contenter d'énumérer les besoins énergétiques liés à l'utilisation quotidienne des modèles d'IA, c'est toutefois négliger le potentiel simultané des technologies numériques à contribuer à la décarbonisation de l'économie en remplaçant des processus physiques par des processus numériques. Comme le souligne Castro (2023), il faut également tenir compte des effets de substitution que ces technologies entraînent.⁶³ Des exemples tels que l'utilisation du courrier électronique au lieu du courrier traditionnel, le visionnage de films en streaming au lieu de la location de DVD physiques et la préférence pour les conférences vidéo au lieu des réunions en face à face illustrent cet effet. **Si l'effet de substitution est théoriquement clair, les preuves empiriques sont rares.** Un exemple rare est l'étude de Tomlinson et al. (2023), qui compare les émissions de plusieurs systèmes d'IA tels que ChatGPT, BLOOM et Midjourney avec celles d'humains effectuant les mêmes tâches. Ils constatent qu'une IA rédigeant une page de texte émet 130 à 1500 fois moins de CO₂e qu'un humain, tandis qu'une IA créant une image émet 310 à 2900 fois moins.⁶⁴ D'une manière générale, l'IA devrait amplifier les changements de substitution en améliorant la qualité des appels vidéo et en permettant l'exécution de tâches plus efficacement que le travail humain traditionnel, ce qui pourrait réduire la consommation d'énergie globale associée à ces activités.

2.3 Exigences légales et critères de mesure

Depuis un an environ, un certain nombre de pays, dont la Chine, ont commencé à établir des lignes directrices strictes régissant le déploiement des technologies de l'IA. Toutefois, **ces cadres présentent une lacune importante en ce qui concerne l'intégration explicite de la durabilité environnementale.** Lorsqu'elle est mentionnée, elle est souvent traitée comme un aspect facultatif de la gestion des risques plutôt que comme un critère obligatoire. Au niveau municipal, les réglementations abordent à

⁶¹ Voir : Anthesis (n.d.), [Qu'est-ce qu'une tonne de CO₂ ? Nous la rendons tangible. - Anthesis-Groupe neutre pour le climat.](#)

⁶² Voir : [Gaz à effet de serre de l'AEE - visualisation des données - Agence européenne pour l'environnement \(europa.eu\).](#)

⁶³ Castro (2024), [Repenser les préoccupations relatives à la consommation d'énergie de l'IA \(datainnovation.org\).](#)

⁶⁴ Tomlinson et al. (2023), [Les émissions de carbone de l'écriture et de l'illustration sont plus faibles pour l'IA que pour les humains](#), arXiv.

peine les implications environnementales des processus informatiques de l'IA. Si des régions comme l'UE, les États-Unis et le Royaume-Uni ont mis en place des règles strictes en matière de réglementation de l'IA, elles s'attachent avant tout à préserver les intérêts des consommateurs et des entreprises, ainsi qu'à garantir la sécurité et l'ouverture des marchés numériques. Cette approche centrée sur la concurrence pourrait négliger le besoin crucial d'intégrer la durabilité environnementale dans les lois et réglementations relatives à l'IA. Comme le fait remarquer un universitaire, "il n'y a aucune garantie que si nous ouvrons le marché et que nous avons 10 000 Microsoft Azure au lieu d'un seul, l'empreinte environnementale de l'industrie se réduira comme par magie".⁶⁵ C'est pourquoi certains observateurs estiment que la durabilité des systèmes d'IA devrait être incluse dans les réglementations relatives à l'IA "afin d'atténuer leur impact sur l'environnement pendant la phase de conception du modèle plutôt que d'être une réflexion a posteriori".⁶⁶

2.3.1 Loi européenne sur l'IA

Dans le cas de l'UE, la nouvelle **loi sur l'IA vise principalement à atténuer les risques pour la sécurité et à défendre les droits fondamentaux, mais elle inclut également une certaine forme de protection environnementale de haut niveau**. Comme le notent les chercheurs en éthique de l'IA, "les préoccupations distales liées aux activités de développement en amont sont largement exclues du champ d'application de la loi sur l'IA, telles que les incidences sociétales et environnementales du matériel et de l'infrastructure informatiques".⁶⁷ La proposition finale de loi sur l'IA reconnaît les considérations environnementales et charge la Commission de collaborer avec les organismes européens de normalisation pour établir des normes en matière de rapports et de documentation, en mettant l'accent sur l'amélioration de l'efficacité des ressources des systèmes d'IA. Il s'agit notamment de réduire la consommation d'énergie et de ressources tout au long du cycle de vie des systèmes d'IA à haut risque et de promouvoir le développement économe en énergie de modèles d'IA à usage général. Toutefois, jusqu'à présent, les mesures visant à réduire l'impact environnemental des systèmes d'IA sont limitées et inadéquates, certaines étant volontaires, et les détails clés dépendent du processus de normalisation. En mai 2023, avant de finaliser la loi sur l'IA, la Commission a envoyé une demande de normalisation aux organismes européens de normalisation.⁶⁸ Cette demande n'incluait pas de normes relatives à la consommation d'énergie des modèles et systèmes d'IA, de sorte qu'une demande actualisée est nécessaire immédiatement. La Commission devrait consulter le comité de l'UE sur l'IA, le forum consultatif et d'autres parties prenantes avant de publier cette mise à jour. Le calendrier de la demande de mise à jour est incertain, de même que la date de livraison de ces normes.⁶⁹ En outre, les **fournisseurs de modèles d'IA à usage général, qui impliquent généralement un traitement important des données et donc une forte consommation d'énergie, sont tenus de déclarer leur consommation d'énergie**. Si la consommation d'énergie du modèle n'est pas connue, une estimation basée sur l'utilisation des ressources informatiques est suffisante. Les fournisseurs de systèmes d'IA à haut risque doivent envisager et signaler à l'autorité de régulation tout dommage environnemental direct ou indirect en tant qu'incident grave. Notre étude empirique ci-dessus suggère

⁶⁵ Cath (2024), [L'avenir que nous voulons est-il "plus de nuages" ? A Dispatch from the FTC AI Tech Summit | TechPolicy.Press](#).

⁶⁶ OCDE (2023), [Les entreprises ou les lois et réglementations donneront-elles un jour la priorité à la durabilité environnementale des systèmes d'IA ? - OCDE.AI](#).

⁶⁷ Attard-Frost et Widder (2023), L'éthique des chaînes de valeur de l'IA, [Modèle de compte rendu - WORD \(arxiv.org\)](#).

⁶⁸ Voir : Commission (2023), Décisions du 22.5.2023 relatives à une demande de normalisation adressée au Comité européen de normalisation et au Comité européen de normalisation électrotechnique à l'appui de la politique de l'Union en matière d'intelligence artificielle, [eNorm Plate-forme](#).

⁶⁹ Warso et Shrishak (2024), [Hope : The AI Act's Approach to Address the Environmental Impact of AI | TechPolicy.Press](#).

que le cadre actuel de la loi sur l'IA est inadéquat et que des approches supplémentaires sont nécessaires pour réglementer les impacts environnementaux de l'IA générative. Il est essentiel que des **normes relatives à la consommation d'énergie des modèles d'IA soient exigées et élaborées dès que possible et qu'elles incluent des normes de déclaration pour la phase d'utilisation de l'IA** ("inférence"), par exemple au moyen de la définition de différents scénarios d'utilisation standard par les fournisseurs d'IA avant le lancement sur le marché.

2.3.2 Différentes manières de mesurer l'impact environnemental de l'IA

Si l'on accepte ce postulat, la question clé est de savoir comment mesurer les différents impacts de l'IA tout au long du cycle de vie. Les **émissions dites directes, liées à l'informatique, sont relativement faciles à mesurer**. À titre d'exemple, nous citons ici "CodeCarbon", un logiciel libre permettant d'estimer l'empreinte CO₂ de l'informatique en fonction du lieu.⁷⁰ Il calcule les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) générées par les ressources informatiques nécessaires à l'exécution du code, encourageant ainsi les développeurs à rendre leur code plus efficace. Le tracker surveille notamment la consommation d'énergie des principaux services en nuage et des centres de données sur site. Il utilise les données accessibles pour calculer les émissions de CO₂ en tenant compte de l'empreinte carbone de l'électricité utilisée par le matériel connecté. Le tracker enregistre l'équivalent CO₂ estimé pour chaque projet et compile ces données pour des projets individuels ainsi que pour des organisations entières. En outre, il offre des conseils aux développeurs sur la manière de réduire les émissions en choisissant une infrastructure en nuage dans des zones qui s'appuient sur des sources d'énergie plus propres. Dans la section sur les recommandations politiques ci-dessous (section 4), nous commentons plus en détail ce potentiel d'incitation au "codage vert".

Toutefois, ces mesures liées à la qualité du codage ne s'étendent pas aux effets indirects au-delà de l'informatique. Une étude approfondie sur trois ans a révélé une lacune importante dans les pratiques de reporting des fournisseurs de LLM, qui ne divulguent traditionnellement que la consommation d'énergie directe et les émissions associées au cycle de formation d'un modèle, fournissant ainsi une image incomplète de l'impact réel sur l'environnement.⁷¹ Si l'on considère l'ensemble du cycle de vie de ces modèles, y compris la production de matériel et l'énergie opérationnelle, les émissions totales pourraient potentiellement doubler, avec des émissions supplémentaires importantes pendant la phase d'utilisation du modèle. Pour remédier à cette situation, les chercheurs ont proposé un ensemble de critères plus fondamentaux pour la collecte de données sur la consommation d'énergie tout au long des phases de développement du système et de formation du modèle, y compris l'efficacité de l'utilisation de l'énergie (PUE), une métrique qui offre une mesure transparente de l'efficacité énergétique informatique d'un centre de données par rapport à sa consommation d'énergie globale.⁷²

Au-delà des effets directs (formation et déploiement), **l'utilisation de l'IA a également des retombées sociétales plus larges**. De ce point de vue, une étude récente de Bitkom estime que les technologies numériques ont un facteur d'habilitation compris entre 6 et 9, une mesure qui montre le rapport entre les économies de CO₂ et l'empreinte carbone des technologies numériques. Cela illustre le rôle important que l'innovation numérique pourrait, en théorie, jouer dans l'atténuation des effets du

⁷⁰ Code : [GitHub - mlco2/codecarbon](https://github.com/mlco2/codecarbon) : Suivre les émissions de Compute et recommander des moyens de réduire leur impact sur l'environnement. Voir aussi : BCG (2020), [Top AI Experts Create CodeCarbon, a Tool to Track and Reduce Computing's CO2 Emissions \(bcg.com\)](#).

⁷¹ Rohde et al. (2024a), [Prendre des mesures \(politiques\) pour améliorer la durabilité des systèmes d'IA \(ioew.de\)](#).

⁷² Rohde et al (2024b), [Élargir la perspective de l'intelligence artificielle durable - ScienceDirect](#).

changement climatique, non seulement en augmentant l'efficacité, mais aussi en encourageant de nouvelles pratiques durables.⁷³ De même, Bill Gates a suggéré que l'IA pourrait permettre aux pays de consommer moins d'énergie en améliorant l'efficacité des technologies et des réseaux électriques, même si davantage de centres de données seraient nécessaires. Cependant, les critiques affirment que ce point de vue ne tient pas compte de l'impact environnemental de la construction de nouveaux centres de données dans le monde, un processus qui n'est pas encore réalisable en utilisant uniquement des énergies renouvelables. Ils soulignent également que les nouveaux appareils alimentés par l'IA, tels que les PC Copilot+ et les iPhones dotés de l'"Apple Intelligence", ont tendance à consommer beaucoup plus d'énergie que leurs prédécesseurs.⁷⁴ En d'autres termes, toute vision optimiste des retombées de l'IA peut être remise en question en raison de l'imprévisibilité inhérente à un avenir régi par l'IA de manière exponentielle, en particulier avec la tendance croissante vers des modèles d'IA plus grands ainsi que des appareils améliorés par l'IA et la consommation de ressources qui leur est associée.

En fait, si la quantification des avantages actuels fournit un instantané précieux, la **prévision des scénarios futurs reste extrêmement difficile en raison des effets de rebond potentiels et de l'escalade de la demande en puissance de calcul et en centres de données induite par l'expansion de l'IA**. Les chercheurs ont fait valoir que l'impact des émissions à ce niveau sociétal reste incertain, en partie à cause des divers mécanismes par lesquels elles se produisent, qui rendent la mesure et la prédiction difficiles.⁷⁵ Les observateurs du secteur se demandent également si l'essor actuel de l'IA générative se poursuivra comme prévu ou s'il atteindra bientôt un plateau en raison des rendements décroissants de l'augmentation du nombre de données d'apprentissage et des poids des modèles, ce qui ajoute à l'incertitude quant à l'impact sur la durabilité à long terme.⁷⁶ Il est révélateur que les estimations des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie du secteur mondial des technologies de l'information pour 2015 diffèrent d'un facteur 2, tandis que les projections pour 2025 diffèrent jusqu'à 25 fois.⁷⁷ Afin de traiter et d'estimer de manière significative le rebond et les autres effets sociétaux, une plus grande transparence tout au long du cycle de vie du produit est nécessaire pour mieux comprendre et gérer l'augmentation de la consommation. Toutefois, cette transparence pourrait imposer des charges bureaucratiques supplémentaires aux entreprises, ce qui suggère qu'un équilibre entre les exigences réglementaires et les idées axées sur le marché est nécessaire pour intégrer efficacement les efforts de protection de l'environnement tout en minimisant les obstacles à la croissance. Pour parvenir à ce compromis optimal, la section suivante propose une approche itérative à trois niveaux pour réglementer l'empreinte énergétique des modèles d'IA.

2.4 Comment concevoir la transparence de l'IA générative pour soutenir la transition jumelle ?

Sur la base de la discussion précédente concernant les exigences techniques et informatiques de l'IA générative et leur impact sur les modèles de consommation d'énergie, cette section propose une

⁷³ Bitkom (2024), [Klimaeffekte der Digitalisierung 2.0 | Studie 2024 | Bitkom e. V.](#)

⁷⁴ Voir : Mantel (2024), [Bill Gates a réussi à réduire la consommation d'énergie de KI-Rechenzentren de manière satisfaisante, en ligne](#). Ambrose et Hern (2024), [AI will be help rather than hindrance in hitting climate targets, Bill Gates says, The Guardian \(L'](#)

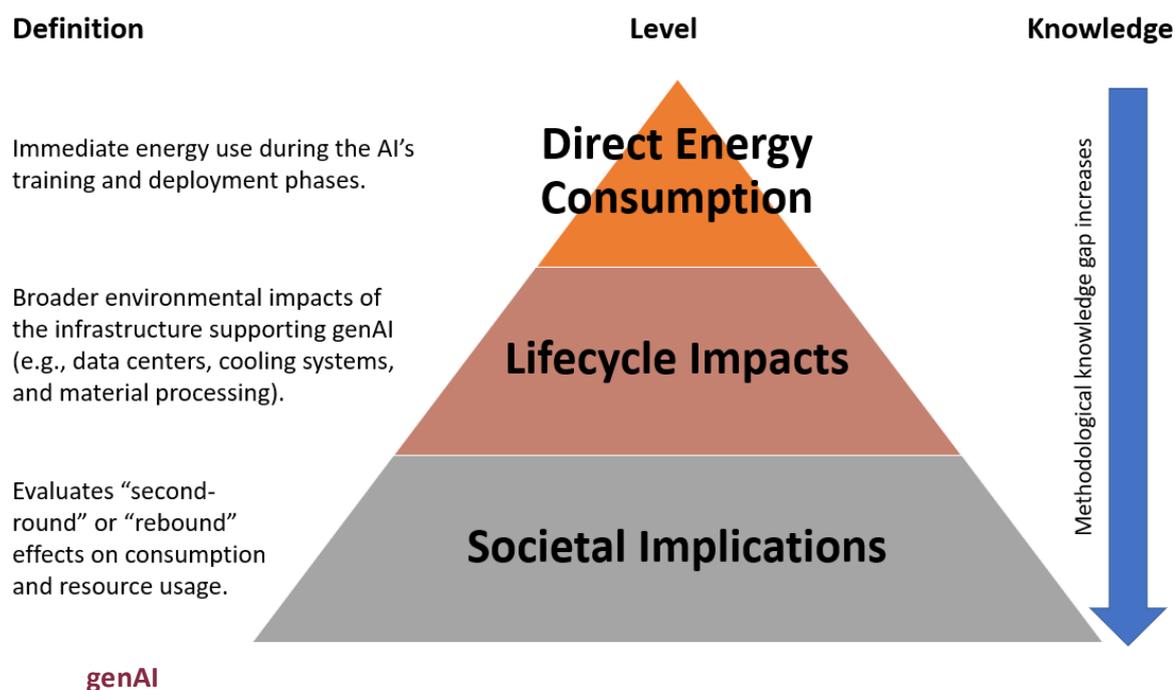
⁷⁵ Kaack et al. (2022), Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. Nat. Clim. Chang. 12, pp. 518-527.

⁷⁶ Waugh (2024), [Les experts en intelligence artificielle qui pensent que le boom de l'IA pourrait s'essouffler, Daily Mail Online](#).

⁷⁷ Cité d'après : Bremer et al. (2023), Assessing Energy and Climate Effects of Digitalization : Methodological Challenges and Key Recommendations (25 mai 2023). nDEE Framing Paper Series, disponible sur SSRN.

approche à trois niveaux pour conceptualiser et mesurer l'empreinte énergétique des modèles d'IA générative (Figure 7).⁷⁸ Ce schéma peut être utilisé pour de futures orientations visant à rendre opérationnelles les obligations de la loi européenne sur l'IA en matière de transparence de la consommation d'énergie pour les développeurs de modèles de fondation à usage général, et il peut contribuer à aligner le double objectif de l'UE en matière de durabilité et de numérisation - tel qu'il est envisagé dans la stratégie de "transition jumelle" pour l'Europe.

Fig. 7: Une approche à trois niveaux pour conceptualiser/mesurer l'empreinte énergétique de la



Source : Chiffre propre, basé sur une communication personnelle avec Verena Müller (TU Munich).

2.4.1 Niveau 1

Au niveau le plus élémentaire, on peut saisir la consommation directe d'énergie de genAI pendant la phase d'entraînement et de déploiement (inférence) de ces modèles (niveau 1). Comme indiqué ci-dessus, ces deux phases du cycle de vie sont intrinsèquement gourmandes en énergie et nécessitent des ressources informatiques importantes. Une mesure précise et en temps réel de l'énergie consommée par les systèmes d'IA au cours de ces phases est essentielle pour que les développeurs et les régulateurs puissent gérer efficacement les demandes énergétiques immédiates des technologies de genAI. Conformément aux exigences de déclaration de la loi européenne sur l'IA, le fait de se concentrer sur ce niveau le plus tangible de la consommation d'énergie de la genAI devrait encourager le développement d'algorithmes et de matériel d'IA plus efficaces sur le plan énergétique.

2.4.2 Niveau 2

Au-delà de la consommation directe, le deuxième niveau examine les impacts indirects de l'infrastructure qui soutient la genAI, y compris les centres de données, les systèmes de refroidissement, l'extraction et le traitement des matières premières telles que les terres rares, et le

⁷⁸ L'accent mis sur ces trois niveaux s'inspire d'une conversation personnelle avec Verena Müller (TU Munich) lors du 3e symposium Max Planck Law-Tech-Society Graduate Student Symposium, en ligne, le 26 avril 2024.

recyclage potentiel (niveau 2). Ces éléments rendent compte de l'empreinte environnementale plus large de la genAI, mais ils ont jusqu'à présent rarement été pris en compte dans le débat et ne sont pas couverts par la législation de l'UE sur l'IA. Par exemple, la disponibilité des ressources locales en énergie et en eau est déjà apparue comme un facteur clé de la faisabilité économique et politique de l'établissement de centres de données nationaux.⁷⁹ Pour prendre en compte l'impact de ces facteurs indirects, les évaluations du cycle de vie devraient être étendues au-delà de l'inférence de l'IA et réalisées sur toutes les infrastructures de genAI afin de saisir l'impact environnemental complet, de la construction à l'exploitation et au démantèlement. Si cela devenait obligatoire à l'avenir, cela pourrait encourager l'adoption de technologies de refroidissement avancées, la récupération de la chaleur perdue dans les centres de données et l'augmentation du recyclage des matériaux critiques. Les centres de données peuvent en effet améliorer leur efficacité énergétique en adoptant des solutions de refroidissement innovantes et en s'installant dans des régions où les sources d'énergie renouvelable sont abondantes, ce qui est également conforme aux incitations économiques des entreprises de Big Tech. Comme nous l'avons montré, les investissements "verts" des grandes entreprises technologiques sont étroitement liés à l'emplacement de leurs centres de données, par exemple dans des régions telles que la Virginie du Nord, une plaque tournante pour les centres de données des grandes entreprises technologiques et les projets d'énergie renouvelable.⁸⁰ En outre, étant donné que les centres de données sont de plus en plus nécessaires pour former des modèles d'IA et développer d'autres produits numériques, souvent dans le nuage, les entreprises de Big Tech s'efforcent de les rendre plus efficaces sur le plan énergétique, par exemple en recherchant de meilleurs moyens de les refroidir et de recycler leur chaleur résiduelle.⁸¹

2.4.3 Niveau 3

La troisième couche examine les implications sociétales éventuelles de la genAI, décrites ci-dessus comme des effets de "second tour" ou de "rebond" (niveau 3). En théorie, ces effets au niveau du système peuvent être à la fois positifs et négatifs et s'annuler ou même se renforcer mutuellement.⁸² Par exemple, si l'IA générative peut accroître la consommation grâce à des services plus efficaces, elle a également le potentiel de réduire considérablement l'utilisation des ressources grâce à l'optimisation des processus économiques et sociaux. Des études suggèrent que l'intégration de l'IA dans les industries pourrait conduire à des réductions significatives de l'utilisation des ressources et des émissions,⁸³ soulignant le potentiel de l'IA générative à contribuer de manière significative à la durabilité industrielle. Toutefois, pour mettre en évidence ces impacts et tirer parti de leur potentiel (si l'aspect positif domine effectivement), il est essentiel que la recherche future établisse des cadres normalisés pour évaluer ces effets de second tour/de rebond de l'IA générative sur la société, en tenant compte à la fois des modèles de consommation et des économies de ressources.

Dans l'ensemble, une telle approche structurée à trois niveaux pour conceptualiser l'empreinte énergétique de l'IA générative est essentielle pour atteindre le double objectif de transition de l'UE. Commencer par les impacts immédiats et étendre progressivement aux impacts du cycle de vie et aux impacts sociétaux permettra une compréhension et une gestion complètes de l'empreinte environnementale de la genAI. Toutefois, à mesure que nous passons du niveau 1 au niveau 3, la

⁷⁹ Lazard (2023), [La géopolitique de l'intelligence artificielle](#).

⁸⁰ Arcieri (2022), [centres de données Les demandes de](#).

⁸¹ Jones (2018), [Comment empêcher les centres de données d'engloutir l'électricité mondiale \(nature.com\)](#).

⁸² Kaack et al. (2022), Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. Nat. Clim. Chang. 12, pp. 518-527.

⁸³ Bitkom (2024), [Klimaeffekte der Digitalisierung 2.0 | Studie 2024 | Bitkom e. V.](#)

complexité des données requises pour une mesure précise augmente considérablement. En d'autres termes, le **fossé de nos connaissances méthodologiques actuelles se creuse à chaque niveau ascendant**, de la consommation directe d'énergie au niveau 1 aux impacts plus nuancés du cycle de vie et aux impacts sociétaux aux niveaux 2 et 3. Compte tenu des limites actuelles de notre compréhension et de la nature évolutive de la technologie de l'IA générative, **une approche pragmatique dans l'application de la loi européenne sur l'IA et des orientations ultérieures consisterait à donner la priorité au premier niveau de mesure directe**. Cela permet d'éviter l'erreur de la "présomption de connaissance" (von Hayek) et facilitera l'établissement de données de base et de méthodologies de mesure robustes. Au fil du temps, à mesure que la recherche méthodologique progresse, les décideurs politiques peuvent progressivement élargir l'objectif de la réglementation et des lignes directrices afin d'inclure les dimensions plus complexes des niveaux deux et trois. Nous suggérons donc une approche par étapes.

3 Étude de cas n° 2 : l'euro numérique

Depuis quelques années, les banques centrales du monde entier envisagent de créer des monnaies numériques pour compléter les formes traditionnelles de monnaie, telles que l'argent liquide. Si les raisons de cette évolution sont multiples, le déclin de l'utilisation des billets de banque et des pièces de monnaie pour les paiements, l'évolution en cours vers des moyens de paiement numériques privés et l'adoption des crypto-monnaies et des stablecoins sont souvent cités comme des facteurs décisifs. Par ailleurs, l'UE et en particulier la Banque centrale européenne (BCE) examinent de plus près la possibilité d'établir une monnaie numérique de banque centrale ("MNBC") pour le grand public ("MNBC de détail") dans la zone euro ("euro numérique"). Les principaux objectifs de cette étape potentielle sont de garantir que la monnaie de banque centrale ayant cours légal reste disponible et qu'il existe un moyen de paiement de pointe et rentable pour le grand public, au-delà de tous les moyens de paiement privés existants et futurs. En outre, les aspects liés à la protection de la vie privée, les considérations relatives à la stabilité financière et la promotion de l'inclusion financière sont les principales questions débattues en ce qui concerne l'introduction potentielle d'un euro numérique.

Toutefois, comme pour l'adoption et la mise en œuvre de nombreuses nouvelles technologies et innovations dans le secteur financier et des paiements - un euro numérique prospectif serait l'une d'entre elles -, elles risquent souvent d'être incompatibles avec les objectifs environnementaux globaux ou européens tels que spécifiés dans l'accord de Paris sur le climat, sur lequel 195 pays du monde entier se sont mis d'accord il y a près d'une décennie,⁸⁴ et/ou le "Green Deal européen" lancé en 2019 et presque achevé à la fin de la présente législature.

Ces dernières années, les médias, les universitaires et les hommes politiques ont de plus en plus débattu des problèmes liés à la durabilité de plusieurs crypto-monnaies émises et extraites à titre privé, comme le bitcoin. Leur forte consommation d'énergie, en particulier, tire la sonnette d'alarme, sans parler de leur impact sur la création de déchets électroniques. En revanche, la durabilité des MNBC, telles que l'euro numérique, a reçu moins d'attention, en partie parce qu'elles sont encore en cours de développement.

Dans ce contexte, il semble crucial d'intégrer des considérations de durabilité concernant les MNBC dès le début du processus de création et en temps utile avant leur entrée sur le marché. Dans cette section, nous souhaitons examiner de plus près les risques et les avantages en matière de durabilité d'un éventuel futur euro numérique et formuler quelques recommandations sur la manière dont cette nouvelle monnaie numérique pourrait contribuer à la transition vers une zone euro neutre sur le plan climatique.

3.1 Le projet d'euro numérique

L'idée d'un euro numérique est d'établir une MNBC de détail comme complément numérique aux billets de banque et aux pièces de monnaie. Comme l'argent liquide, il s'agirait d'une forme officielle de monnaie de banque centrale directement accessible au public, dotée du statut de monnaie légale et proposée comme moyen de paiement numérique public, coexistant avec les moyens de paiement numériques privés existants et futurs.

La BCE travaille sur l'introduction d'une telle MNBC de détail - l'"euro numérique" - depuis octobre 2020, date à laquelle elle a publié un rapport sur l'euro numérique et lancé une consultation sur le

⁸⁴ Nations unies (2015), Accord de Paris.

projet. Moins d'un an plus tard, en juillet 2021, elle a lancé une "phase d'enquête" de deux ans. La phase d'enquête a débuté en octobre 2021 avec pour objectif de traiter les questions clés relatives à la conception et à la distribution de l'euro numérique.⁸⁵ En octobre 2023, la BCE a conclu sa phase d'enquête et a lancé une "phase de réalisation" de deux ans, annonçant officiellement le début de cette phase en novembre 2023.⁸⁶ Les principaux objectifs de cette phase en cours sont de finaliser les règles relatives à l'euro numérique, de sélectionner les fournisseurs d'infrastructures et de plateformes et de définir les caractéristiques techniques de la MNBC. Ce n'est qu'à l'issue de cette phase, c'est-à-dire en novembre 2025, que la BCE décidera s'il y a lieu d'émettre un euro numérique, à quelle date⁸⁷, et quelle conception technique utiliser.

Parallèlement aux travaux de la BCE, le législateur européen a entamé l'élaboration d'un cadre réglementaire destiné à soutenir l'émission de l'euro numérique par la BCE. En juin 2023, la Commission a proposé un règlement sur l'euro numérique (COM(2023) 369, voir [cepPolicyBrief](#)).⁸⁸ L'objectif du règlement est de "garantir l'utilisation efficace de l'euro numérique en tant que monnaie unique dans l'ensemble de la zone euro, en répondant aux besoins des utilisateurs à l'ère numérique et en favorisant la concurrence, l'efficacité, l'innovation et la résilience dans l'économie en voie de numérisation de l'UE".⁸⁹ Le règlement établira l'euro numérique et régira ses principales caractéristiques, tout en laissant à la BCE la décision d'autoriser son émission et l'émission elle-même.⁹⁰ La BCE doit respecter les règles et les spécifications du règlement sur l'euro numérique. Néanmoins, elle a un droit de regard important sur les détails techniques de l'euro numérique, car les décisions sur ces aspects relèvent principalement de la compétence du Conseil des gouverneurs de la BCE.⁹¹ Dans les mois et les années à venir, le Parlement européen et le Conseil devront finaliser leurs travaux sur la proposition de règlement. Ce n'est qu'à ce moment-là que la BCE pourra émettre l'euro numérique.

3.2 L'impact écologique des différents moyens de paiement

Les solutions et les infrastructures de paiement sont essentielles au fonctionnement des systèmes financiers et de la société dans son ensemble. Cependant, elles ne sont pas toujours respectueuses de l'environnement, peuvent engendrer des coûts énergétiques élevés et présenter de faibles niveaux d'efficacité énergétique. Prévoir et quantifier l'impact environnemental d'un futur euro numérique potentiel est un défi car il n'a pas encore été introduit et, comme indiqué ci-dessus, la décision finale sur ses fonctionnalités, la ou les infrastructures à utiliser et, en fin de compte, sa conception technique n'a pas encore été prise.

⁸⁵ https://www.ecb.europa.eu/euro/digital_euro/timeline/html/index.en.html

⁸⁶ BCE (2023) L'Eurosystème passe à la phase suivante du projet d'euro numérique, Communiqué de presse, 18 octobre 2023.

⁸⁷ Burkhard Balz, de la banque centrale allemande, pense que l'euro numérique ne sera pas émis avant 2028 ["Der digitale Euro bietet große Chancen - auch für Banken", Interview avec Börsen-Zeitung online, 7 mai 2024]. Joachim Nagel, de la banque centrale allemande, a même déclaré que "si nous décidons [d'émettre un euro numérique], je m'attends à ce qu'il faille quatre à cinq ans pour introduire un euro numérique" [Joachim Nagel : Digital euro - vision, advances and challenges, Introductory remarks by Dr Joachim Nagel, President of the Deutsche Bundesbank, at the fireside chat with Massachusetts Institute of Technology students, Cambridge, Massachusetts, 16 April 2024].

⁸⁸ Proposition COM(2023) 369 du 28 juin 2023 pour un règlement sur l'établissement de l'euro numérique, voir [cepPolicy](#)[PolicyBrief](#).

⁸⁹ COM(2023) 369, p. 2.

⁹⁰ COM(2023) 369, considérant 8.

⁹¹ COM(2023) 369, considérant 8.

Néanmoins, dans cette section, nous voulons montrer que l'euro numérique, s'il est bien conçu, pourrait contribuer à un paysage européen des paiements plus conforme aux objectifs européens et mondiaux en matière de durabilité. À cet égard, nous souhaitons d'abord examiner de plus près les solutions de paiement existantes et leur impact sur l'environnement, avant de tirer des leçons pour une éventuelle conception future de l'euro numérique.

3.2.1 Billets de banque et pièces de monnaie ("espèces")

Les billets de banque et les pièces de monnaie ("l'argent liquide") restent le moyen de paiement le plus populaire parmi les Européens lorsqu'ils effectuent des achats dans un point de vente.⁹² Comme toute autre solution de paiement, l'argent liquide a une empreinte environnementale négative, imputable à sa production, sa distribution et son élimination. En outre, l'alimentation des distributeurs automatiques de billets (DAB), le transport et l'authentification des billets au point de vente ont un impact. Cependant, plusieurs études ont montré que l'impact environnemental des paiements en espèces est relativement modeste.

En 2018, par exemple, la Nederlandsche Bank (DNB) a publié une étude sur l'impact écologique du système néerlandais de paiement en espèces à l'aide d'une analyse du cycle de vie (ACV). Elle a conclu que l'impact d'une transaction moyenne en espèces n'était que de 5,1 g CO₂e, avec un potentiel de réduction supplémentaire, par exemple en investissant dans des sources d'énergie renouvelables pour les distributeurs automatiques de billets ou des véhicules moins polluants pour transporter les billets et les pièces. L'étude attribue l'impact environnemental le plus important à la phase d'exploitation (64 %) et à la phase de production des pièces (31 %).⁹³

En 2020, Ripple a publié un document sur l'impact environnemental des crypto-monnaies, qui comprenait également une estimation de la consommation d'électricité d'une transaction en espèces (0,044 KWh en 2018). L'estimation ne portait toutefois que sur l'impression des billets de banque et leur circulation via les distributeurs automatiques de billets, sans tenir compte des impacts plus larges liés, par exemple, au transport de la monnaie fiduciaire.^{94,95}

Tab. 2: Empreinte environnementale des billets de banque en euros par rapport à d'autres produits courants

	Valeur en micropoints (μPt).	Équivalent trajet en voiture
Valeur annuelle moyenne des paiements en espèces par CAE en 2019	101	8
Impact environnemental annuel d'un citoyen de l'UE en 2019	1003686	79575
71 bouteilles d'eau par an	3429	272
Production et lavage d'un t-shirt en coton	697	55

Source : BCE (2023) : BCE (2023), Product Environmental Footprint study of euro banknotes as a payment instrument, décembre 2023.

L'année dernière, la BCE a publié un document sur l'empreinte environnementale des billets de banque en euros en tant qu'instrument de paiement. Il a montré qu'en 2019, l'impact environnemental des transactions en billets en euros effectuées par un citoyen moyen de la zone euro (EAC) ne constituait qu'une très faible proportion de l'impact total de ces citoyens (0,01 %). Le score global de la valeur

⁹² BCE (2022), Study on the payment attitudes of consumers in the euro area (SPACE), Francfort-sur-le-Main.

⁹³ Hanegraaf, R. et al. (2018), Life cycle assessment of cash payments.

⁹⁴ Ripple (2020), Measuring the Environmental Impact of Cryptocurrency.

⁹⁵ Lee, S., & Park, J. (2022), Environmental implications of a central bank digital currency (MNBC).

annuelle moyenne des paiements en espèces par EAC se situait à un niveau de 101 micropoints (μPt).⁹⁶ Cela correspond à un niveau de seulement un septième de celui de la production et du lavage hebdomadaire d'un t-shirt sur une année ou d'un EAC moyen conduisant une voiture standard sur 8 kilomètres (voir tableau 2).

En ce qui concerne les sources de l'empreinte environnementale, la BCE a attribué 37 % à l'alimentation des distributeurs automatiques de billets, 35 % au transport et 10 % aux activités de traitement au stade de la distribution (10 %). La fabrication du papier et l'authentification des billets dans les points de vente n'ont qu'un effet mineur de 9 % et 5 % respectivement. L'impact des billets en euros sur le changement climatique représente environ 40 % de l'impact environnemental total.⁹⁷

3.2.2 Paiements par carte de crédit

Si l'impact environnemental des paiements en espèces est plutôt faible, il a été démontré que l'empreinte des paiements par carte de crédit est encore plus faible. Ces paiements, qui représentent la plupart des transactions numériques dans un contexte mondial, nécessitent encore moins d'électricité que la monnaie fiduciaire. On estime que chaque transaction par carte de crédit ne consomme que 0,0008 (Visa) ou 0,0006 (MasterCard) kWh d'énergie. Ces quantités seraient encore plus faibles si les transactions par carte s'appuyaient sur une infrastructure de paiement moderne au lieu des systèmes traditionnels moins efficaces souvent utilisés.^{98,99,100} En 2020, la consommation d'électricité combinée des transactions par carte de crédit de Visa, MasterCard et American Express a été estimée à environ 0,5 milliard de kWh.¹⁰¹

3.2.3 Cryptomonnaies

Si les crypto-monnaies ne jouent pas un rôle majeur sur les marchés des paiements actuels, les technologies sur lesquelles elles reposent sont souvent considérées comme des éléments constitutifs potentiels pour l'établissement des MNBC et, par conséquent, de l'euro numérique.

Cependant, de nombreuses crypto-monnaies ont été critiquées non seulement pour leur forte volatilité dans le passé, mais aussi pour leur impact négatif important sur l'environnement. Selon les estimations actuelles, la crypto-monnaie privée la plus populaire au monde - le bitcoin - consomme par exemple 139 térawattheures (TWh) par an¹⁰², ce qui représente environ 0,6 % de la consommation mondiale totale d'électricité¹⁰³ ou les niveaux de consommation d'énergie de pays entiers tels que les Pays-Bas ou la Norvège.¹⁰⁴ En 2020, la consommation d'électricité par transaction en bitcoins a été estimée à 700 kWh¹⁰⁵ et a donc largement dépassé celle des paiements en espèces et par carte de crédit (voir ci-dessus). Le fait que le bitcoin agisse comme un grand livre décentralisé, dans lequel

⁹⁶ Le BESEC comprenait 16 catégories d'impact environnemental différentes, dont le changement climatique. Pour quantifier l'impact environnemental global, ces catégories ont été converties en micropoints (μPt).

⁹⁷ BCE (2023), Product Environmental Footprint study of euro banknotes as a payment instrument, décembre 2023.

⁹⁸ Lee, S., et Park, J, (2022).

⁹⁹ Agur, M. I. et al. (2022), Digital currencies and energy consumption, Fonds monétaire international.

¹⁰⁰ Le niveau de consommation d'énergie serait probablement encore plus bas si l'on utilisait uniquement des cartes de crédit numériques au lieu de cartes de crédit physiques.

¹⁰¹ House, W. (2022), Climate and energy implications of crypto-assets in the united states. Consulté le 21 octobre.

¹⁰² Voir <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci> (données récupérées le 3 juillet 2024).

¹⁰³ Agur, M. I. et al. (2022).

¹⁰⁴ Cristina Criddle, Bitcoin Consumes 'More Electricity than Argentina', BBC, (Feb. 10, 2021), <https://www.bbc.com/news/technology-56012952>.

¹⁰⁵ Rybski, R. (2024), Sustainability, Public Security, and Privacy Concerns Regarding Central Bank Digital Currency (MNBC). In Digital Transformation and the Economics of Banking. Taylor & Francis.

toutes les transactions sont visibles par tous, exige une puissance de calcul considérable. En outre, les déchets électroniques sont souvent mentionnés comme un problème majeur du bitcoin et des crypto-monnaies de type bitcoin, car les appareils utilisés pour leur production ("minage") doivent être remplacés régulièrement.¹⁰⁶

La question de savoir si les crypto-monnaies peuvent être considérées comme écologiquement durables ou non dépend toutefois de la technologie sur laquelle elles reposent. L'empreinte écologique négative des crypto-monnaies mentionnées ci-dessus découle principalement de leurs mécanismes de consensus et de validation décentralisés ("proof-of-work. POW") et de la référence à des technologies de registres distribués (DLT) sans permission. Le problème des DLT sans permission est qu'il faut beaucoup d'électricité pour valider les transactions car, dans les processus complexes de minage, les mineurs rivalisent pour être les premiers à résoudre des problèmes mathématiques complexes.

Toutefois, il existe d'autres technologies de validation et mécanismes de consensus, tels que les protocoles de preuve d'enjeu (POS) ou de graphe acyclique dirigé, qui ont pris de l'ampleur récemment, notamment en raison des critiques sur la non-durabilité des concepts POW. Ethereum, par exemple, est passé à un mécanisme de consensus POS et a réduit sa consommation d'énergie d'environ 99,9 %. D'autres crypto-monnaies, telles que Solana et Cosmos, utilisent également le POS au lieu du POW. Le POS est considéré comme plus écologique car il ne nécessite pas les mêmes calculs gourmands en ressources que le POW. En outre, le passage d'un DLT sans permission, qui permet à n'importe qui de valider des transactions, à un DLT avec permission, qui n'a que des validateurs autorisés et identifiés, offre d'autres possibilités d'économies d'énergie.

Outre le fait qu'elles consomment moins d'énergie, les études montrent également que les crypto-monnaies qui s'appuient sur des DLT avec permission bénéficient d'économies d'échelle énergétiques plus importantes que celles qui s'appuient sur des DLT sans permission. En outre, il a été démontré que la consommation d'énergie par transaction des crypto-monnaies qui utilisent des DLT avec permission et des mécanismes de consensus non-POW peut même être inférieure à celle des transactions par carte de crédit.^{107,108,109}

Par conséquent, les crypto-monnaies ne sont pas écologiquement insoutenables en soi. En fait, leur respect de l'environnement varie considérablement et dépend principalement des choix technologiques.

3.2.4 Comparaison entre les différents moyens de paiement existants

En général, la comparaison de l'impact environnemental des différents moyens de paiement existants n'est pas une tâche facile et ne peut généralement pas être réalisée de manière directe et objective. De nombreuses limites doivent être gardées à l'esprit.¹¹⁰ Les estimations suivantes doivent donc être lues avec prudence.

¹⁰⁶ Agur, M. I. et al. (2022).

¹⁰⁷ Ibid.

¹⁰⁸ Lee, S. et Park, J. (2022).

¹⁰⁹ Mary Pan (2024), Impact environnemental des monnaies numériques : A Closer Look at MNBCs, 24 janvier 2024.

¹¹⁰ Par exemple, une comparaison valable entre les transactions en espèces ou par carte de crédit et les transactions en crypto-monnaies nécessiterait des montants de transactions similaires. Or, les crypto-monnaies font l'objet de beaucoup moins de transactions. En outre, le calcul de l'empreinte des paiements par carte dépend fortement du nombre et des types d'acteurs, par exemple les banques des commerçants, impliqués et de leurs systèmes et infrastructures (existants) utilisés. De plus, les systèmes DLT offrent la possibilité d'effectuer plusieurs paiements en une seule transaction. [House, W. (2022) ; Agur, M. I. et al. (2022)].

Ripple, par exemple, a essayé de comparer la consommation d'électricité des transactions en bitcoins, en espèces, en Visa et en Mastercard, montrant l'impact très négatif des premières par rapport aux secondes (voir le tableau 3).¹¹¹

Tab. 3: Consommation d'électricité par transaction

	Consommation d'électricité par transaction	Année
Bitcoin	700	2020
Argent liquide	0,044	2018
Visa	0,0008	2018
Carte Mastercard	0,0006	2018

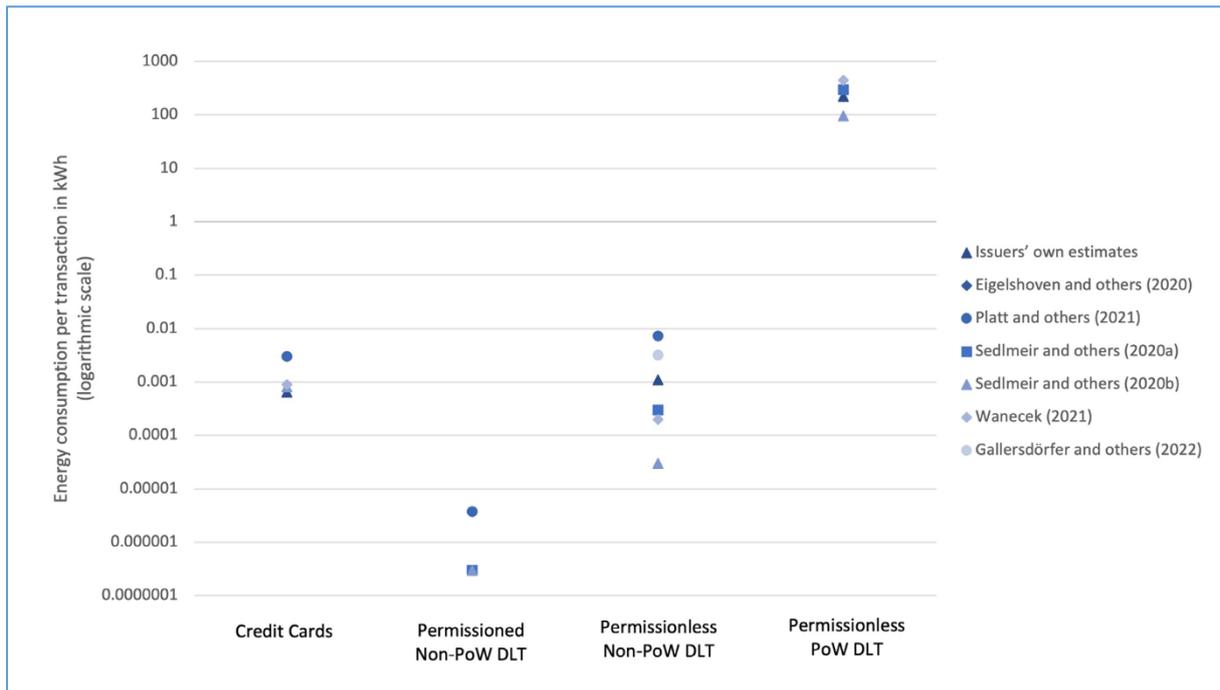
Source: Ripple (2020) Measuring the Environmental Impact of Cryptocurrency.

Et bien que Visa, Mastercard et American Express aient traité ensemble environ 310 milliards de transactions de paiement en 2020, contre seulement 460 millions pour Bitcoin et Ethereum, les premiers ont consommé moins de 1 % de l'électricité des seconds.¹¹²

¹¹¹ Ripple (2020), Measuring the Environmental Impact of Cryptocurrency.

¹¹² House, W. (2022).

Fig. 8: Consommation d'énergie (en kWh) par transaction pour le traitement de base de certains systèmes de paiement



Source : Agur, M. I. et al. (2022).

Un autre article a comparé les niveaux de consommation d'énergie par transaction de différents paiements basés sur les DLT avec les systèmes de paiement par carte de crédit. Il montre clairement la plus grande efficacité énergétique de ces derniers par rapport aux crypto-monnaies sans permission basées sur le POW. Toutefois, les systèmes de cartes de crédit sont perdants lorsqu'ils sont comparés aux crypto-monnaies sans permission basées sur le POW (voir figure 8).¹¹³

3.3 La durabilité est-elle un facteur pour la BCE, l'UE et le G7 lors de la création de l'euro numérique ?

3.3.1 Les intentions de la BCE

Comme indiqué ci-dessus, la BCE a publié en octobre 2020 un rapport sur l'euro numérique.¹¹⁴ Ce rapport définit plusieurs principes fondamentaux - par exemple la convertibilité au pair, la neutralité du marché -, des exigences spécifiques à chaque scénario - par exemple l'efficacité numérique, les caractéristiques similaires à celles des espèces, les caractéristiques concurrentielles -, et des exigences générales - par exemple la conformité réglementaire, la facilité d'accès - pour un euro numérique.¹¹⁵ Ces exigences et principes visent à garantir "l'accessibilité, la robustesse, la sécurité, l'efficacité et la confidentialité" de l'euro numérique.¹¹⁶

Si les considérations de durabilité ne sont certainement pas la principale priorité de la BCE lorsqu'il s'agit de concevoir un euro numérique, l'empreinte écologique ne lui échappe pas complètement. Dans le rapport susmentionné, la BCE déclare qu'un euro numérique "pourrait représenter une option

¹¹³ Agur, M. I. et al. (2022).

¹¹⁴ BCE (2020), Rapport sur l'euro numérique, octobre 2020.

¹¹⁵ Ibid, annexe 1.

¹¹⁶ Lee, S. et Park, J. (2022).

pour réduire les coûts globaux et l'empreinte écologique des systèmes monétaires et de paiement"¹¹⁷ et qu'elle souhaite "soutenir de manière proactive les améliorations"¹¹⁸ à cet égard. La BCE affirme qu'elle souhaite non seulement concevoir l'euro numérique de manière à réduire les coûts de l'écosystème de paiement actuel (exigence 7a), mais aussi fonder la MNBC de détail sur des solutions technologiques qui minimisent son empreinte écologique (exigence 7b). En outre, si elle est mise en place, la BCE souhaite se concentrer sur "le coût et l'efficacité énergétique de l'euro numérique par rapport aux moyens de paiement existants", ce qui laisse entendre qu'elle souhaite surpasser ces derniers à cet égard.^{119,120}

De plus, fin janvier 2024, la BCE a publié un "Plan climat et nature" dans lequel elle prévoit d'étendre ses travaux sur le changement climatique en 2024 et 2025. Ces travaux comprendront également des mesures visant à atteindre les objectifs de réduction des émissions de carbone dans le cadre des activités de la BCE. L'un des éléments de ce plan pour le climat et la nature consiste également à "intégrer des considérations relatives à l'empreinte environnementale" dans la conception de l'euro numérique. Cela se fera au cours de la " phase de préparation " qui est actuellement en cours.^{121,122} Récemment, la BCE a déclaré que, dans le cadre de cette phase, elle envisageait plusieurs mesures pour minimiser l'impact sur l'environnement. Elle souhaite optimiser l'ensemble de la chaîne de valeur de l'euro numérique et préconise, dans la mesure du possible, " d'éviter les protocoles consommateurs d'énergie et de réutiliser les composants ". En outre, la BCE souhaite adhérer aux "meilleures pratiques en matière de performance environnementale et de transparence".¹²³

Toutefois, la configuration technique d'un euro numérique potentiel, qui est cruciale pour déterminer si la MNBC sera écologiquement durable ou non, reste actuellement ouverte. La BCE a testé une solution centralisée basée sur la plate-forme TARGET Instant Payment Settlement (TIPS)¹²⁴, ainsi que des solutions basées sur la technologie du grand livre décentralisé (DLT). En outre, une combinaison des deux approches a également été testée.¹²⁵ Fondamentalement, la BCE n'a pas encore décidé de la technologie à utiliser pour l'émission d'un euro numérique.¹²⁶

3.3.2 Les intentions de la Commission européenne

En juin 2023, la Commission européenne a présenté une proposition de règlement sur l'établissement de l'euro numérique. Au-delà de la proposition d'en faire une nouvelle MNBC de détail pour la zone euro, le règlement établit des règles concernant, en particulier, son cours légal, sa distribution, son

¹¹⁷ Ibid, p. 3.

¹¹⁸ Ibid, p. 15.

¹¹⁹ Ibid, S. 15.

¹²⁰ Rybski, R. (2024) conclut que les exigences en matière de développement durable formulées par la BCE constituent " une déclaration claire " selon laquelle la BCE " a l'intention de concurrencer les prestataires de services de paiement privés sur le plan de l'empreinte écologique (y compris de l'efficacité énergétique) ".

¹²¹ BCE (2024a), ECB steps up climate work with focus on green transition, climate and nature-related risks, Communiqué de presse, 30 janvier 2024.

¹²² BCE (2024b), Plan climat et nature 2024-2025, 30 janvier 2024.

¹²³ BCE (2024c), Progress on the preparation phase of a digital euro, First progress report, 24 juin 2024.

¹²⁴ Le TIPS est la plateforme paneuropéenne dédiée au règlement des paiements instantanés en monnaie de banque centrale. Ces paiements instantanés concernent les transactions électroniques de détail qui doivent être réglées en quelques secondes, conformément au système de virement instantané du SEPA (SCT Inst).

¹²⁵ Martin Arnold, Interview with Fabio Panetta, Member of the Executive Board of the ECB, Financial Times, 20 juin 2021, disponible ici : <https://www.ecb.europa.eu/press/inter/date/2021/html/ecb.in210620~c8acf4bc2b.en.html>.

¹²⁶ Mooij, A. A. (2022), L'euro numérique et les considérations énergétiques : La BCE peut-elle introduire l'euro numérique en tenant compte des besoins énergétiques potentiels ? German Law Journal, 23(9), pp. 1246-1265.

utilisation, ainsi que ses caractéristiques techniques essentielles.¹²⁷ Alors que la BCE se réserve le droit d'autoriser l'émission de l'euro numérique¹²⁸, le règlement proposé établit le cadre réglementaire nécessaire sur lequel repose cette émission. Il "devrait garantir l'utilisation effective de l'euro numérique en tant que monnaie unique dans l'ensemble de la zone euro, en répondant aux besoins des utilisateurs à l'ère numérique et en favorisant la concurrence, l'efficacité, l'innovation et la résilience dans l'économie en voie de numérisation de l'UE"¹²⁹. Alors que de nombreuses fonctionnalités et exigences que la Commission souhaite voir remplir par l'euro numérique peuvent avoir des implications écologiques (considérables) - par exemple, le souhait d'une fonctionnalité de paiement en ligne et hors ligne -, la proposition ne stipule aucune exigence spécifique en matière d'"écologisation" à laquelle l'euro numérique devra répondre lorsqu'il sera mis en œuvre. Par conséquent, il appartient principalement à la BCE d'intégrer ces considérations dans ses réflexions sur la conception de l'euro numérique.

Néanmoins, la Commission examine les conséquences de l'adoption d'un euro numérique sur le développement durable et, tout en concluant qu'en raison de l'absence d'une conception concrète de l'euro numérique, son impact sur l'environnement est actuellement difficile à estimer, elle estime qu'il est comparable à celui des moyens de paiement existants. La Commission est parvenue à ce jugement parce qu'un euro numérique est susceptible d'être basé sur une infrastructure de paiement similaire ou identique, au moins en ce qui concerne sa "version en ligne".¹³⁰ À cet égard, la Commission pense principalement aux systèmes utilisés pour les paiements par carte de crédit et estime que si une telle infrastructure est utilisée, l'euro numérique sera en fin de compte plus respectueux de l'environnement que l'argent liquide, c'est-à-dire les billets de banque et les pièces de monnaie, et que, puisque l'euro numérique peut dans une certaine mesure remplacer l'argent liquide, cet effet de substitution peut améliorer la durabilité de l'écosystème de paiement européen actuel.¹³¹

Il est intéressant de noter que si la Commission laisse à la BCE la décision finale sur la conception technique de l'euro numérique, elle semble s'opposer aux solutions technologiques utilisées par plusieurs crypto-monnaies qui reposent sur des procédures de consensus et de minage gourmandes en énergie. Elle affirme que ces procédures "non durables" ne sont pas nécessaires pour un euro numérique, qui est soutenu par la légitimité de la BCE.¹³²

3.3.3 Les intentions du G7

Le 5 juin 2021, les ministres des finances et les gouverneurs des banques centrales du Groupe des Sept (G7) ont publié un communiqué dans lequel ils demandent que toute future MNBC potentielle soutienne notamment l'innovation, la concurrence et l'inclusion. En outre, les MNBC devraient être à la fois "résilientes et économes en énergie".¹³³ Quatre mois plus tard, en octobre 2021, ces appels ont

¹²⁷ Commission de l'UE (2023), Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil concernant l'établissement de l'euro numérique, COM(2023) 369, Art. 1.

¹²⁸ Ibid, art. 4 (1).

¹²⁹ Ibid, p. 2.

¹³⁰ Ibid, p. 11.

¹³¹ Commission de l'UE (2023), Document de travail des services de la Commission, rapport d'analyse d'impact, Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil concernant l'établissement de l'euro numérique et Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil concernant la fourniture de services numériques en euros par des prestataires de services de paiement constitués dans des États membres dont la monnaie n'est pas l'euro et modifiant le règlement (UE) 2021/1230 du Parlement européen et du Conseil et Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil concernant le cours légal des billets de banque et des pièces en euros, SWD(2023) 233 final, 28.6.2023, p. 86.

¹³² Ibid, p. 86.

¹³³ G7 (2021), Communiqué des ministres des finances et des gouverneurs des banques centrales, 5 juin 2021.

été détaillés lorsque le G7 a publié un total de 13 principes de politique publique pour les MNBC de détail. Ces principes ont été publiés dans un esprit de coopération et de coordination internationales et avec l'arrière-pensée de s'assurer que toute émission d'une MNBC dans une juridiction, qui a des implications de politique publique pour d'autres juridictions, soit prise en compte par les banques centrales lorsqu'elles décident d'émettre une MNBC.¹³⁴

Si les principes établis traitent de plusieurs questions décisives liées à l'émission de MNBC, comme la stabilité monétaire et financière, la confidentialité des données, la concurrence ou les considérations liées à la cybersécurité, les ministres et les gouverneurs ont également présenté quelques réflexions sur les aspects énergétiques et environnementaux des MNBC.¹³⁵ En fin de compte, ils demandent que "l'utilisation de l'énergie de toute infrastructure de MNBC" [...] soit "aussi efficace que possible pour soutenir les engagements communs de la communauté internationale en faveur d'une transition vers une économie "nette zéro"". Outre la prise en compte de la consommation d'énergie des MNBC lors de leur conception et de leur mise en œuvre, ils recommandent également aux banques centrales de divulguer, dans le cadre de leurs rapports sur le climat, l'impact environnemental des opérations des MNBC (principe 8).¹³⁶

Il est clair que ces principes convenus par les ministres et les gouverneurs du G7 ne sont pas contraignants et que les banques centrales ne sont donc pas tenues de les intégrer dans leurs décisions concernant l'émission de MNBC. Toutefois, étant donné qu'ils reflètent des valeurs communes, le fait de s'engager à les respecter témoigne d'une volonté de réfléchir aux implications environnementales plus larges de l'introduction des MNBC.

3.4 Facteurs influençant l'empreinte écologique de l'euro numérique

3.4.1 Configuration technique

Il est évident que le choix de la configuration technique utilisée pour l'euro numérique - décentralisée, centralisée ou une combinaison des deux / basée sur la DLT ou non - aura un impact sur son empreinte écologique.

L'utilisation d'une solution POW décentralisée serait inévitablement la solution la moins intéressante du point de vue de la consommation d'énergie. La mise en œuvre d'écosystèmes décentralisés avec des niveaux de consommation d'énergie similaires à ceux de l'argent ou des moyens de paiement existants semble presque impossible.¹³⁷ Des estimations ont montré que la mise en œuvre d'une telle solution pourrait nécessiter plus d'énergie que la Hongrie à moyen terme, étant donné qu'il faudrait traiter chaque jour des millions de transactions numériques en euros provenant de millions de citoyens et d'entreprises européens.¹³⁸

D'autre part, une solution centralisée permettrait d'utiliser des algorithmes de consensus beaucoup plus simples pour vérifier les transactions. Les validateurs pourraient être sélectionnés et il n'y aurait pas de dépendance à l'égard d'un grand nombre de mineurs et de la nécessité d'effectuer de nombreux calculs pour parvenir à un consensus.¹³⁹ L'Eurosystème pourrait choisir (et ajuster) quels acteurs - par exemple la BCE, les banques, d'autres prestataires de services de paiement - sont autorisés à vérifier

¹³⁴ Sunak, R., & Bailey, A. (2021), Public Policy Principles for Retail Central Bank Digital Currencies (MNBCs). G7 UK.

¹³⁵ Ibid, p. 5.

¹³⁶ Ibid, p. 11 et 12.

¹³⁷ Lee, S. et Park, J. (2022).

¹³⁸ Mooij, A. A. (2022).

¹³⁹ Lee, S. et Park, J. (2022).

les transactions en euros numériques.¹⁴⁰ Dans ce cas, le minage resterait inutile. La confiance dans la nouvelle monnaie numérique résulterait du fait qu'elle serait émise et soutenue par la BCE au lieu de se référer à une foule anonyme de mineurs.¹⁴¹ En fin de compte, selon une étude réalisée en 2020, une option centralisée entraînerait une consommation d'énergie environ huit fois inférieure à celle d'une option décentralisée.¹⁴²

Lorsqu'il s'agit d'opter pour un euro numérique¹⁴³ basé ou non sur un DLT (ne reposant pas sur le POW), les estimations montrent qu'en principe, les deux variantes peuvent être aussi efficaces sur le plan énergétique, voire plus efficaces, que les moyens de paiement les plus efficaces actuellement, c'est-à-dire les cartes de crédit. Toutefois, la question de savoir si c'est le cas et laquelle des deux options serait préférable pour un euro numérique dépend largement de l'utilisation de systèmes nouveaux ou anciens et du choix des composants (par exemple, le matériel) nécessaires à leur fonctionnement.^{144,145}

Si la conception technique de l'euro numérique est certainement l'un des facteurs les plus déterminants pour l'empreinte écologique de la monnaie numérique, il existe plusieurs autres facteurs qui auront une influence sur sa durabilité. Nous allons maintenant présenter certains de ces facteurs (de manière non exhaustive) :

3.4.2 Source d'énergie

L'une des questions les plus importantes concerne la source d'énergie sur laquelle reposera l'euro numérique. Comme le souligne Rybski (2024), l'empreinte écologique dépend fortement du fait que la source soit neutre en carbone ou renouvelable. Cela inclut l'utilisation de l'énergie solaire ou éolienne pour alimenter les centres de données qui traitent les transactions en euros numériques. Contrairement à un cadre décentralisé pour l'euro numérique, dans un cadre centralisé, la BCE serait en mesure de décider de la combinaison énergétique et pourrait, en principe, opter pour une combinaison plus écologique (si elle est suffisamment disponible).¹⁴⁶

3.4.3 L'euro numérique comme moyen de paiement supplémentaire et les effets de substitution

La BCE émettra probablement l'euro numérique en tant que nouveau moyen de paiement, qui s'ajoutera à une pléthore de méthodes de paiement existantes et qui n'est pas destiné en premier lieu à remplacer les méthodes existantes (du moins pas dans leur intégralité). Par exemple, la Commission et la BCE souhaitent expressément que les billets et les pièces puissent encore être utilisés à l'avenir. En outre, il a été déclaré qu'un euro numérique "ne devrait pas conduire à l'éviction des services de paiement numérique dans le secteur privé" et constituerait simplement une autre option de paiement.¹⁴⁷ Néanmoins, l'euro numérique pourrait devenir un moyen de paiement concurrent à la fois de l'argent liquide et des nombreuses solutions de paiement privées, numériques ou non. L'impact

¹⁴⁰ Giaglis, G. et al. (2021), Central Bank Digital Currencies and a Euro for the Future.

¹⁴¹ Lee, S. et Park, J. (2022).

¹⁴² Sedlmeir, J. et al. (2020), La consommation d'énergie de la technologie blockchain : Beyond myth. Business & Information Systems Engineering, 62(6), pp. 599-608.

¹⁴³ Le système TARGET Instant Payment Settlement (TIPS) est un exemple de ce type de système. Pour en savoir plus, voir ci-dessous.

¹⁴⁴ Lee, S. et Park, J. (2022).

¹⁴⁵ Wang, H. (2023), Addressing Governance Challenges of Digitalisation and Sustainability : A Perspective of Central Bank Digital Currency.

¹⁴⁶ Rybski, R. (2024).

¹⁴⁷ <https://www.bundesbank.de/de/aufgaben/unbarer-zahlungsverkehr/digitaler-euro/faq-digitaler-euro>.

environnemental de l'euro numérique dépend donc également de la question de savoir s'il y aura substitution de ces autres moyens de paiement et de leurs empreintes écologiques respectives. Si l'euro numérique est conçu de manière plus durable que, par exemple, les paiements en espèces, par carte de crédit ou par téléphone portable, l'abandon de ces dernières méthodes de paiement pourrait constituer une évolution positive d'un point de vue écologique.¹⁴⁸ Cependant, le fait est qu'une nouvelle solution de paiement sur le marché, nécessitant une variété de nouveaux éléments d'infrastructure, de logiciel et de matériel, d'appareils, de cartes et d'interfaces frontales, aura inévitablement des répercussions sur l'environnement.

3.4.4 Structure à deux niveaux ou à un niveau

La BCE et la Commission souhaitent que les prestataires de services de paiement (PSP), et en particulier les banques, fournissent l'euro numérique en offrant des comptes de paiement pour l'euro numérique ainsi que les services de paiement correspondants.¹⁴⁹ L'euro numérique ne sera pas fourni par la BCE elle-même, mais sera mis à disposition par des intermédiaires supervisés. Les deux institutions souhaitent donc conserver une structure à deux niveaux pour la distribution de l'euro numérique, similaire à la structure de diffusion des espèces. Il s'agit principalement de soutenir l'innovation et la concurrence sur les marchés des paiements et d'éviter de surcharger la BCE avec des tâches pour lesquelles elle n'a ni la capacité ni l'expérience. Néanmoins, le fait d'opter pour un système à deux niveaux plutôt qu'à un seul (où la BCE et/ou les banques centrales nationales distribueraient l'euro numérique et offriraient des services de paiement) a des conséquences d'un point de vue écologique. La principale raison est qu'un système à un niveau impliquerait moins d'acteurs, alors qu'un système à deux niveaux nécessite une plus grande capacité de calcul, une duplication de l'infrastructure et des processus. Ainsi, bien qu'il y ait de bons arguments pour inclure des intermédiaires autorisés dans la mise à disposition de l'euro numérique, un tel choix est susceptible d'entraîner une augmentation de la consommation d'énergie.^{150,151}

3.4.5 Accès universel ou restreint

La BCE et la Commission européenne souhaitent accorder à l'euro numérique le statut de monnaie légale. Cela signifie que, comme dans le cas de l'euro sous forme physique (billets et pièces), il ne peut être refusé par un bénéficiaire en règlement d'une dette libellée dans la même monnaie, qu'il doit être accepté à sa pleine valeur nominale et que son utilisation pour effectuer un paiement libère le payeur de l'obligation de paiement.¹⁵² Cette règle générale ne prévoit que des dérogations mineures.¹⁵³ Ainsi, elle sera largement accessible, contrairement aux moyens de paiement privés qui sont généralement limités à la clientèle de leurs fournisseurs. Cette particularité de l'euro numérique peut s'accompagner de coûts environnementaux, car elle nécessite potentiellement la fourniture de multiples "solutions d'accès" pour satisfaire les besoins particuliers des différents clients (par exemple, pour permettre une

¹⁴⁸ Si, par exemple, l'euro numérique se révèle être un substitut à l'argent liquide, réduisant l'utilisation de ce dernier, cela peut, d'une part, améliorer la durabilité car moins de billets et de pièces doivent être imprimés et transportés. D'autre part, même si l'utilisation de l'argent liquide diminue, les installations permettant de distribuer les billets et les pièces doivent être maintenues intactes, par exemple les distributeurs automatiques de billets doivent toujours être actifs, même si le nombre de retraits diminue.

¹⁴⁹ COM(2023) 369, considérant 26.

¹⁵⁰ Mooij, A. A. (2022).

¹⁵¹ Agur, M. I. et al. (2022).

¹⁵² COM(2023) 369, considérant 14 et art. 7 (2-5).

¹⁵³ COM(2023) 369, art. 9 et 10.

inclusion financière complète).¹⁵⁴ En revanche, les fournisseurs de solutions privées sont souvent en mesure d'opter pour des approches plus spécifiques afin de répondre aux besoins des clients (potentiels) (par exemple, un appareil spécifique, un portefeuille spécifique, une carte physique spécifique, etc.)

3.4.6 Euro numérique en ligne ou hors ligne

Comme l'envisagent la BCE et la Commission européenne, il y aura très probablement deux variantes de l'euro numérique, une version en ligne et une version hors ligne.¹⁵⁵ Un tel choix a également des répercussions sur l'environnement. Bien qu'il existe plusieurs raisons non liées au développement durable pour adopter les deux solutions - par exemple l'inclusion financière et les considérations liées à la protection de la vie privée -, le fait de les avoir toutes les deux non seulement ajoute de la complexité à l'écosystème des paiements numériques en euros, mais nécessite également le fonctionnement en parallèle de deux infrastructures et solutions de paiement numérique en euros distinctes, qui, en outre, doivent être synchronisées l'une avec l'autre d'une manière spécifique. En outre, il semble probable que de nombreux utilisateurs de l'euro numérique ne s'en tiendront pas à une seule des deux variantes, mais utiliseront à la fois la version hors ligne et la version en ligne. La variante en ligne de l'euro numérique sera très probablement basée sur des solutions numériques (matérielles et logicielles) actuellement disponibles - comme les smartphones, les dispositifs portables, les applications de paiement mobile, les services basés sur le web - ou l'équivalent. En fonctionnant sur des appareils que les utilisateurs possèdent déjà, l'euro numérique ne nécessiterait pas de nouvelle solution technique, mais simplement, par exemple, l'installation d'une application mobile spécifique. Par conséquent, il aura probablement des implications en termes de consommation d'énergie similaires à celles des solutions de paiement actuelles.¹⁵⁶ Le maintien de l'empreinte environnementale à un faible niveau dépend donc en grande partie de la possibilité d'utiliser les ressources physiques existantes et largement répandues ("pas de nouveau téléphone portable") et du fait que le matériel et les logiciels déployés par les utilisateurs de l'euro numérique ont été conçus en tenant compte de considérations écologiques. D'autre part, si de nouveaux appareils ou des interfaces frontales supplémentaires sont nécessaires, cela peut accroître la "brutitude" de l'euro numérique dans sa version en ligne.¹⁵⁷ En outre, une version en ligne de l'euro numérique nécessitera probablement une connectivité permanente aux serveurs et à l'internet et dépendra de la disponibilité de grands centres de données. Ces deux facteurs pourraient se traduire par une empreinte environnementale moins favorable. La version hors ligne de l'euro numérique pourrait, au lieu d'utiliser des services et des dispositifs basés sur le web tels que des ordinateurs ou des smartphones, être basée sur des cartes physiques interopérables et compatibles, comparables aux cartes de crédit. Si de telles cartes sont utilisées, contrairement à la version en ligne, elles pourraient ne pas nécessiter une connectivité constante à l'internet ou l'utilisation intensive des installations de stockage des centres de données, ce qui réduirait leur impact écologique. Et même lorsque des dispositifs spécifiques sont utilisés pour les paiements numériques en euros hors ligne, les transactions peuvent être stockées temporairement sur les dispositifs et synchronisées ultérieurement (lorsqu'une connexion internet est disponible). En

¹⁵⁴ À titre d'exemple, la Commission propose que l'euro numérique soit accessible au moyen d'un large éventail de dispositifs matériels [COM(2023) 369, considérant 54 et article 22, paragraphe 1].

¹⁵⁵ La Commission souhaite que les utilisateurs de l'euro numérique puissent l'utiliser pour les paiements hors ligne et en ligne (COM(2023) 369, considérant 34, article 23). 23).

¹⁵⁶ Lee, S. et Park, J. (2022).

¹⁵⁷ Agur, M. I. et al. (2022).

revanche, la production et la distribution de ces nouvelles cartes physiques pourraient consommer des ressources supplémentaires.

Tant pour l'euro numérique hors ligne que pour l'euro numérique en ligne, un facteur décisif sera également de savoir si les infrastructures existantes peuvent être utilisées par les commerçants en ce qui concerne leurs points de vente (POS) et par les banques en ce qui concerne leurs distributeurs automatiques de billets (DAB). Si ces infrastructures peuvent être facilement mises à niveau, aucune nouvelle infrastructure ou solution matérielle ne devra être mise en œuvre, ce qui permettra d'effectuer des paiements ou des retraits sur la base de normes communes et interopérables, et donc d'atténuer tout impact négatif potentiel sur l'environnement.

3.4.7 Services frontaux pour l'euro numérique

Les utilisateurs finaux de l'euro numérique sont censés pouvoir y accéder et l'utiliser par l'intermédiaire de services frontaux. La Commission veut obliger les prestataires de services de paiement (PSP) à fournir un tel service à leurs clients. Chaque PSP pourra décider d'offrir un service frontal qu'il développera lui-même ou d'utiliser un service développé par la BCE.¹⁵⁸ Par conséquent, il est très probable qu'il y aura plusieurs services frontaux différents disponibles qui devront être en mesure d'interagir les uns avec les autres. Si la référence à une seule interface frontale spécifique peut être problématique du point de vue de la concurrence et de l'innovation, l'existence de plusieurs d'entre elles pourrait ajouter de la complexité à l'écosystème des paiements numériques en euros et, en l'absence de garanties appropriées, réduire la capacité à le maintenir sur une voie durable.

3.4.8 Fonctionnalité de limite de maintien et de cascade (inversée)

Un autre paramètre qui influencera l'impact environnemental de l'euro numérique sera les "instruments" envisagés pour limiter l'utilisation de l'euro numérique comme réserve de valeur. Tant la Commission (¹⁵⁹) que la BCE (¹⁶⁰) souhaitent que de tels instruments soient mis en œuvre pour des raisons de politique monétaire et de stabilité financière. L'instrument le plus probable serait celui d'une ou plusieurs limites de détention. S'il était mis en œuvre, un utilisateur d'euros numériques ne serait autorisé à détenir des euros numériques que jusqu'à un certain montant fixe, par exemple 3 000 euros.¹⁶¹ Si les utilisateurs d'euros numériques reçoivent des paiements en ligne en euros numériques dépassant cette (a) limite(s), ils pourront transférer les fonds excédentaires automatiquement sur un compte de paiement en euros non numériques ("fonctionnalité de cascade") et si leurs avoirs en euros numériques sont inférieurs au montant d'un paiement, ils pourront mobiliser les fonds manquants à partir d'un compte de paiement en euros non numériques ("fonctionnalité de cascade inversée").

Compte tenu des deux caractéristiques d'un euro numérique potentiel, il est évident que l'instauration d'une ou de plusieurs limites de détention pourrait, dans la pratique, réduire sa facilité d'utilisation, diminuer la probabilité d'effets de substitution significatifs et, en fin de compte, réduire le volume des transactions effectuées avec l'euro numérique, par rapport à une situation sans limite de détention. Toutefois, la BCE estime qu'il y aura encore des centaines de millions de transactions par jour effectuées par environ 400 millions d'utilisateurs d'euros numériques.¹⁶² Ce volume aura également une incidence sur l'empreinte environnementale de l'euro numérique. Des volumes de transactions

¹⁵⁸ COM(2023) 369, art. 28.

¹⁵⁹ COM(2023) 369, art. 15 et 16.

¹⁶⁰ BCE (2020), Rapport sur l'euro numérique, octobre 2020.

¹⁶¹ Il est également question de fixer des limites différentes pour l'euro numérique en ligne et l'euro numérique hors ligne.

¹⁶² <https://www.ecb.europa.eu/press/inter/date/2021/html/ecb.in210620~c8acf4bc2b.en.html>.

plus importants nécessitent des processus plus gourmands en ressources et, par conséquent, une plus grande consommation d'énergie. Le niveau de ces limites de détention jouera donc un rôle important dans l'empreinte écologique de l'euro numérique.

La fonctionnalité de cascade (inversée), qui doit être mise en place pour permettre une expérience de paiement fluide et ininterrompue pour les utilisateurs d'euros numériques, augmentera inévitablement le nombre total de transactions à exécuter. En effet, cette fonction déclenchera de nombreuses transactions supplémentaires entre des comptes en euros numériques et des comptes en euros non numériques et vice versa - en plus de la simple transaction de paiement initiée - et, par conséquent, augmentera probablement encore les niveaux de consommation d'énergie. En outre, cette fonction oblige les utilisateurs d'euros numériques à posséder au moins un compte en euros non numériques. Ainsi, les utilisateurs d'euros numériques ne pourraient normalement pas utiliser uniquement des comptes en euros numériques et éviteraient complètement d'utiliser des comptes en euros non numériques. Ils seraient donc souvent dans l'incapacité de remplacer ces derniers par les premiers (même s'ils le préfèrent), ce qui est une solution plus durable que d'être obligé d'utiliser les deux.

3.4.9 Aspects liés à la sécurité et à la résilience

Il est peu probable que la BCE et les législateurs de l'UE émettent (autorisent l'émission) un euro numérique et permettent sa diffusion par les prestataires de services de paiement si l'infrastructure, les systèmes et les technologies utilisés par la BCE, les banques centrales nationales et les prestataires de services de paiement ne sont pas fiables, à l'abri des défaillances, (cyber)sécurisés et résilients. Afin de ne pas ébranler la confiance dans la nouvelle monnaie numérique, ils seront certainement désireux d'assurer l'utilisabilité et la fonctionnalité permanentes et ininterrompues de l'euro numérique. Cette nécessité exigera le recours à des solutions hautement sophistiquées pour préserver la stabilité de l'écosystème de l'euro numérique. En conséquence, cet impératif pourrait entraîner des dépenses énergétiques supplémentaires, par exemple parce qu'il serait nécessaire de maintenir des sauvegardes de serveurs, de réserver des capacités matérielles et logicielles supplémentaires, d'établir de multiples centres de données, de garantir la sécurité physique des infrastructures et d'autres moyens pour assurer l'intégrité totale de l'euro numérique.^{163,164} À cet égard, la structure à deux niveaux envisagée pour l'euro numérique jouera également un rôle majeur. Étant donné que de nombreux acteurs feront partie de l'écosystème de l'euro numérique, de nombreux systèmes de redondance à forte intensité de ressources doivent être mis en œuvre pour garantir la sécurité des nouveaux moyens de paiement. La limitation du nombre de participants à l'écosystème, bien qu'en conflit avec d'autres objectifs importants, pourrait donc s'avérer plus durable.

3.4.10 Programmabilité d'un euro numérique

La BCE et la Commission envisagent toutes deux d'autoriser les paiements conditionnels ("programmabilité des paiements") avec l'euro numérique, c'est-à-dire des transactions "déclenchées automatiquement par un logiciel sur la base de conditions prédéterminées et convenues"¹⁶⁵. En revanche, ils sont opposés à l'idée d'un euro numérique "programmable" ("monnaie de programme"), c'est-à-dire permettant à des "unités d'euros numériques" [...] d'être utilisées pour acheter des types

¹⁶³ Agur, M. I. et al. (2022).

¹⁶⁴ Wang, H. (2023).

¹⁶⁵ Les paiements conditionnels sont intéressants pour les paiements récurrents, comme le paiement mensuel des frais de gymnastique.

spécifiques de biens et/ou de services ou seulement pendant une certaine période/géographie". La BCE et la Commission ne veulent pas que l'euro numérique soit considéré comme un bon d'achat, limitant la fongibilité totale de chaque unité d'euro numérique et restreignant les utilisateurs finaux en ce qui concerne "où, quand et avec qui les personnes et les entreprises pourraient l'utiliser".^{166,167} Si la volonté de ne pas permettre la programmabilité de l'euro numérique est compréhensible à bien des égards - notamment parce que cette fonctionnalité permet d'orienter le comportement des utilisateurs de l'euro numérique en matière de dépenses, pourrait limiter considérablement leurs libertés économiques et porter atteinte à la vie privée - elle peut également limiter la capacité de l'euro numérique à soutenir la transition vers des économies européennes plus durables. Comme l'a souligné P. K. Ozili (2022), une MNBC et, par conséquent, l'euro numérique pourraient être conçus de telle sorte qu'ils visent non seulement des objectifs tels que "l'efficacité des paiements, la stabilité financière et l'inclusion financière", mais qu'ils puissent également soutenir les objectifs de l'économie circulaire. Si l'euro numérique devait permettre des caractéristiques de programmabilité, il pourrait être utilisé comme un instrument (politique) pour canaliser les fonds vers des activités économiques circulaires, par exemple, et les éloigner des activités économiques linéaires brunes.¹⁶⁸ Par conséquent, bien qu'il ne soit actuellement pas envisagé par la BCE ou la Commission - et nous sommes tout à fait d'accord avec cette décision -, un euro numérique qui intégrerait des caractéristiques de programmabilité pourrait servir d'outil puissant pour améliorer la transition vers un continent respectueux de l'environnement.¹⁶⁹ Une telle caractéristique distinguerait également l'euro numérique des moyens de paiement existants et pourrait donc faire la différence.

3.4.11 Autres facteurs

Outre toutes les questions et tous les choix de conception mentionnés ci-dessus, il existe de nombreux autres aspects qui pourraient jouer un rôle (mineur) en ce qui concerne les considérations écologiques. Par exemple, la phase de développement, de recherche et d'essai en cours entraîne déjà des niveaux et des coûts de consommation d'énergie élevés, ce qui signifie que, même avant la première émission d'un euro numérique, la préparation de cette émission laissera une empreinte carbone négative. En outre, les décisions prises concernant le niveau et la rigueur des mesures d'inclusion financière, le degré de protection de la vie privée et des données à accorder aux utilisateurs de l'euro numérique et les possibilités pour les citoyens de pays tiers et d'États membres de l'UE n'utilisant pas l'euro d'accéder à ce nouveau moyen de paiement et de l'utiliser doivent absolument être prises en compte. La question de la rapidité avec laquelle les transactions en euros numériques¹⁷⁰ devraient être réglées est également un facteur important.

3.5 Les nombreux défis et compromis de la double transition dans la conception d'un euro numérique

Le Conseil a fortement insisté sur la nécessité d'aligner le numérique sur la transition verte et a souligné que l'utilisation des technologies numériques peut offrir des possibilités "de réduire l'empreinte

¹⁶⁶ COM(2023) 369, considérant 55 et art. 24.

¹⁶⁷ https://www.ecb.europa.eu/euro/digital_euro/how-it-works/html/index.en.html.

¹⁶⁸ Ozili, P. K. (2022), Circular economy and central bank digital currency. *Circular Economy and Sustainability*, 2(4), pp. 1501-1516.

¹⁶⁹ Il est clair qu'une telle caractéristique pourrait être utilisée non seulement pour orienter les capitaux vers des activités durables, mais aussi dans le sens contraire. Il s'agirait donc d'une caractéristique dangereuse, susceptible d'être utilisée à la fois pour des objectifs politiques louables et douteux.

¹⁷⁰ La BCE et la Commission souhaitent que les paiements numériques en euros soient réglés instantanément.

environnementale et d'accélérer la transition verte".¹⁷¹ Toutefois, comme nous l'avons vu plus haut, il ne sera probablement pas facile de maîtriser à la fois la transition numérique et la transition écologique en ce qui concerne l'adoption et l'émission de l'euro numérique. L'introduction de l'euro numérique soulève de nombreux défis et nécessite des compromis avec d'autres objectifs qui doivent être correctement abordés et gérés. En effet, la BCE et la Commission s'efforcent également d'atteindre d'autres objectifs, notamment le désir de¹⁷²

- pour une large diffusion de l'euro numérique,
- pour permettre la concurrence entre les prestataires de services de paiement dans l'offre de services numériques en euros,
- permettre aux utilisateurs d'euros numériques de posséder plusieurs comptes en euros numériques (en ligne et hors ligne), qui peuvent en outre être reliés à plusieurs comptes en euros non numériques afin de permettre une expérience de paiement transparente,
- permettre à de multiples matériels et logiciels ainsi qu'à des solutions frontales d'accéder à l'euro numérique et de l'utiliser dans les paiements, ce qui favorisera la concurrence et l'innovation sur le marché des paiements numériques en euros,
- faire de l'euro numérique un moyen de paiement complémentaire et non un substitut aux méthodes de paiement existantes, qu'il s'agisse d'argent liquide ou de solutions privées telles que les cartes de crédit,
- assurer un niveau élevé d'inclusion financière, en permettant au plus grand nombre de personnes possible d'utiliser l'euro numérique, c'est-à-dire les personnes handicapées, les personnes souffrant de limitations fonctionnelles ou les personnes âgées,
- d'établir deux versions différentes de l'euro numérique pour des raisons liées à la protection de la vie privée et à l'inclusion financière, et
- pour faire face aux futurs besoins de paiement de l'économie au sens large, par exemple pour permettre les paiements de machine à machine dans le contexte de l'industrie 4.0.

Tous ces "autres objectifs" peuvent, dans certains cas, entrer en conflit avec les objectifs de durabilité de l'euro numérique. Par conséquent, la BCE et la Commission devraient réfléchir davantage à la question de savoir si tous ces autres objectifs doivent être poursuivis entièrement ou seulement en partie, et comment ces buts peuvent être atteints de manière à ne pas compromettre les ambitions de l'UE de maîtriser la double transition. Dans la section suivante, nous développerons la manière de gérer ce défi de manière appropriée.

¹⁷¹ Conseil de l'UE (2024), L'avenir de la politique numérique de l'UE, Conclusions du Conseil, 21 mai 2024.

¹⁷² COM(2023) 369.

4 Recommandations politiques

Sur la base de notre analyse comparative, nous avons formulé quelques recommandations politiques plus générales à l'intention de la nouvelle Commission, afin de garantir que la "double transformation" soit une réussite et ne soit pas contradictoire.

4.1 Recommandations horizontales

4.1.1 Normes pour la mesure des émissions de carbone sur l'ensemble du cycle de vie de l'IA et des MNBC

Développer une terminologie, des normes et des protocoles communs pour mesurer les émissions de carbone des technologies numériques vertes tout au long de leur cycle de vie : Notre analyse souligne la nécessité d'une méthodologie complète et normalisée pour évaluer et comparer l'impact écologique de diverses solutions numériques, en particulier l'IA générative et différents moyens de paiement, y compris (prospectivement) les MNBC, tout au long de leur cycle de vie.¹⁷³ Par exemple, on ne devrait pas seulement rapporter la quantité d'énergie dépensée pour la formation d'un LLM, mais aussi estimer son impact ultérieur pendant l'inférence/l'utilisation en modélisant différents scénarios d'utilisation. Cette approche s'apparenterait aux évaluations typiques du cycle de vie de certains produits, permettant d'évaluer les effets positifs et négatifs de ces technologies sur la durabilité, conformément à la "recommandation sur l'utilisation des méthodes d'empreinte environnementale" de la Commission.¹⁷⁴ Une telle forme de **normalisation est en fin de compte également dans l'intérêt de l'industrie, car elle permettra d'éviter les doubles emplois et les charges administratives excessives**, et devrait aboutir à une forme de consensus international sur la manière de suivre l'impact environnemental de l'IA et des méthodes de paiement, y compris les MNBC.¹⁷⁵ Pour améliorer la cohérence de la méthodologie et des données, il est également essentiel de développer une terminologie commune¹⁷⁶ pour des concepts clés tels que la "formation à l'IA" ou la "consommation de ressources naturelles" et de faire le point sur les lacunes existantes en matière de données et les problèmes méthodologiques. Cela nécessiterait probablement de développer de meilleurs outils pour évaluer les effets de rebond de la numérisation et pour identifier les mesures permettant de contrer les effets indésirables. Dans ce contexte, les normes et les protocoles peuvent grandement améliorer la cohérence méthodologique.¹⁷⁷ En particulier, des normes pour les données liées à l'IA sont nécessaires pour garantir la qualité et l'accessibilité, et bien que les récents règlements de l'UE n'exigent pas spécifiquement la production de rapports sur l'énergie de l'IA, ils pourraient encourager

¹⁷³ Ce phénomène est déjà reconnu aux États-Unis, où plusieurs représentants démocrates ont récemment introduit la "loi sur les impacts environnementaux de l'intelligence artificielle de 2024", qui demande à l'Autorité de protection de l'environnement de diriger une étude sur les impacts environnementaux de l'IA tout au long de son cycle de vie. [Markey, Heinrich, Eshoo, Beyer introduisent une législation pour enquêter, mesurer les impacts environnementaux de l'intelligence artificielle \(senate.gov\)](#).

¹⁷⁴ [Recommandation sur l'utilisation des méthodes d'empreinte environnementale - Commission européenne \(europa.eu\)](#).

¹⁷⁵ Comme l'a noté l'organe consultatif des Nations unies sur l'IA, "de nouvelles normes et de nouveaux indicateurs mondiaux permettant de mesurer et de suivre l'impact environnemental de l'IA ainsi que sa consommation d'énergie et de ressources naturelles (c'est-à-dire d'électricité et d'eau) pourraient être définis pour guider le développement de l'IA et contribuer à la réalisation des objectifs de développement durable liés à la protection de l'environnement". Organe consultatif de l'ONU sur l'IA (2023), Gouverner l'IA pour l'humanité, [interim report.pdf \(un.org\)](#), p. 19.

¹⁷⁶ Bremer et al. (2023), Assessing Energy and Climate Effects of Digitalization : Methodological Challenges and Key Recommendations (25 mai 2023), nDEE Framing Paper Series, disponible sur SSRN.

¹⁷⁷ Également argumenté par : Bremer et al. (2023), Assessing Energy and Climate Effects of Digitalization : Methodological Challenges and Key Recommendations (25 mai 2023), nDEE Framing Paper Series, disponible sur SSRN.

le développement de telles normes en mettant l'accent sur la transparence et l'efficacité des centres de données.¹⁷⁸ D'une manière générale, la Coalition européenne pour un numérique vert fait déjà progresser la mesure de l'impact environnemental des technologies numériques grâce à la "**méthode d'évaluation de l'impact net du carbone**",¹⁷⁹, dont le déploiement devrait être élargi et accéléré. L'impact carbone net d'une application de technologie numérique est défini comme "la comparaison entre les impacts carbone d'un scénario avec une solution TIC et d'un scénario de référence sans solution TIC dans le même périmètre. Le total des impacts carbone positifs et négatifs de chaque scénario est pris en compte en incluant tous les effets directs et indirects dans le périmètre de l'évaluation". Jusqu'à présent, la Coalition a mené des projets pilotes dans six secteurs, dans le but de développer des méthodes permettant d'estimer l'impact environnemental net de solutions numériques réelles.¹⁸⁰ Ces projets pilotes portaient sur l'énergie, les transports, la construction, les villes intelligentes, l'industrie manufacturière et l'agriculture, c'est-à-dire qu'ils ne couvraient pas l'IA générative ou les MNBC. Globalement, l'objectif devrait être de couvrir ces domaines et d'autres domaines importants par le biais d'autres études de cas et de méthodologies sectorielles, afin de maximiser leur impact positif net (évitement des émissions) tout en minimisant les impacts négatifs (effets de rebond).

4.1.2 Critères de taxonomie pour une infrastructure numérique durable

En juillet 2020, le règlement de l'UE sur la taxonomie [Taxonomie verte, [\(UE\) 2020/852](#), voir [cepAdhoc](#)] est entré en vigueur. Ce règlement définit des critères contraignants qui seront utilisés à l'avenir pour déterminer si une activité économique peut être qualifiée de "durable du point de vue de l'environnement". Pour être qualifiées d'écologiquement durables, les activités économiques doivent contribuer "de manière significative" à au moins un des six objectifs environnementaux et ne doivent pas nuire "de manière substantielle" à l'un de ces objectifs environnementaux. Bien que nous soyons en général très critiques à l'égard de la taxonomie verte, il est peu probable que l'UE abandonne de sitôt cet instrument central pour orienter les capitaux vers des activités économiques "durables". Comme cet instrument est là pour rester, les législateurs pourraient envisager d'intégrer le secteur des TIC dans la taxonomie verte, d'une manière plus stricte qu'à l'heure actuelle.¹⁸¹ Le secteur des TIC pourrait être un catalyseur clé de la transformation durable. À cet égard, il est nécessaire d'examiner de plus près quel type d'infrastructure numérique, nécessaire au fonctionnement de l'écosystème de l'euro numérique et des solutions d'IA, devrait être inclus, en tant qu'activité économique habilitante, dans la taxonomie climatique, et dans quelle mesure. Il est clair que de nombreux types d'infrastructures numériques peuvent ne pas contribuer directement à la réduction des gaz à effet de serre ou à la baisse des niveaux de consommation d'énergie. Toutefois, si les capitaux peuvent être orientés vers les types les plus efficaces et les plus durables, et sur la base de paramètres solides et crédibles, cela peut servir de base à la prolifération de produits et services finaux en euro numérique et en IA plus respectueux de l'environnement.

¹⁷⁸ Luers et al. (2024), [L'IA va-t-elle accélérer ou retarder la course vers des émissions nettes nulles ? \(nature.com\)](#).

¹⁷⁹ La méthodologie peut être téléchargée ici : [EGDC - Méthodologie TIC \(greendigitalcoalition.eu\)](#).

¹⁸⁰ Voir : [Vue d'ensemble des méthodologies de l'EGDC - European Green Digital Coalition](#).

¹⁸¹ Actuellement, le champ d'application de l'acte délégué relatif à la taxonomie climatique [règlement délégué (UE) 2021/2139] en ce qui concerne le secteur des TIC couvre les activités économiques (a) "traitement des données, hébergement et activités connexes" en tant qu'activités dites transitoires, et (b) "solutions basées sur les données pour réduire les émissions de gaz à effet de serre" - y compris l'utilisation de technologies décentralisées (DLT), l'Internet des objets (IoT), la 5G et l'intelligence artificielle - en tant qu'activités dites habilitantes.

4.1.3 Confiance dans le pouvoir des principaux instruments de la politique climatique de l'UE

Lorsqu'ils tentent de limiter l'empreinte écologique d'un futur euro numérique ainsi que celle des solutions d'IA, les décideurs politiques européens devraient en outre s'appuyer sur des instruments de politique climatique bien établis. L'instrument le plus approprié pour orienter les économies européennes vers la neutralité carbone est le système européen d'échange de quotas d'émission (SCEQE), qui inclut également les émissions des industries de production d'énergie et de chaleur. Le SCEQE, en tant qu'instrument de tarification du CO₂ basé sur le marché, contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre de manière efficace, en minimisant les coûts et sans distorsion. Avec sa limite supérieure décroissante pour les émissions de CO₂, il garantit une réduction progressive de ces émissions, augmente les coûts des activités à forte intensité de carbone par rapport aux alternatives à faible intensité de CO₂ et incite donc les acteurs économiques à opter pour ces dernières. Aucune intervention politique supplémentaire n'est nécessaire pour atteindre cet objectif.¹⁸² Ainsi, le SCEQE sert de catalyseur à tous les acteurs économiques d'un écosystème de l'euro numérique ou de l'IA pour choisir des solutions matérielles/logicielles, des infrastructures numériques et des centres de données économes en énergie et respectueux de l'environnement. À cet égard, il sera plus efficace que d'autres instruments politiques classiques liés au climat, tels que les taxes sur le CO₂, les subventions pour les solutions respectueuses du climat ou les interdictions strictes des activités économiques polluantes, qui sont soit moins efficaces pour internaliser les externalités environnementales négatives, soit trop intrusifs ou disproportionnés.¹⁸³

4.2 Recommandations relatives à l'intelligence artificielle

4.2.1 Transparence accrue grâce à la mise en place d'une équipe restreinte, à des règles de divulgation et à la concurrence

Accroître la transparence grâce à des "équipes rouges" externes chargées de la durabilité, à des règles de divulgation des données climatiques et à une concurrence axée sur les consommateurs : Étant donné que la consommation d'énergie n'est souvent pas suivie ou que les données sont gardées secrètes par les grandes entreprises informatiques telles que Google, Facebook et Amazon, on pourrait également suggérer de mettre en œuvre des exigences légales pour que ces entreprises mesurent et divulguent leurs données sur la consommation d'énergie et de ressources.¹⁸⁴ Les entreprises impliquées dans les technologies numériques, telles que décrites dans le présent document, devraient se concentrer sur l'amélioration de la collecte systématique et de la publication de données actuelles et de haute qualité. Il est essentiel de permettre à des chercheurs externes d'accéder aux données et d'utiliser des modèles de durabilité en "red-teaming" pour valider le "côté vert" des nouveaux modèles d'IA générative. Ce red-teaming pourrait être réalisé par des experts de la communauté climatique, tels que l'Energy Modeling Forum et l'Integrated Assessment Modeling Consortium (Consortium pour la modélisation de l'évaluation intégrée). À l'instar des deux lois récentes sur la divulgation des

¹⁸² Pour en savoir plus sur les avantages des systèmes d'échange de quotas d'émission, voir [cepCepInput Special](#) sur la future politique climatique de l'UE : Challenges and Chances.

¹⁸³ Mener, Voßwinkel et Reichert (2023), Das Klimageld als Chance für einen klimapolitischen Neuanfang, Optionen für eine wirksame Ausgestaltung und EU-konforme Finanzierung, 28.11.2023.

¹⁸⁴ Voir l'étude de cas sur la publicité personnalisée en ligne pilotée par l'IA : Marken et al. (2024), [The \(Un-\)Sustainability of Artificial Intelligence in Online Marketing \(ioew.de\)](#).

données climatiques signées par le gouverneur de Californie Gavin Newsom¹⁸⁵, l'UE pourrait envisager d'ordonner aux entreprises technologiques d'être plus transparentes sur les risques et les impacts climatiques qu'elles encourent. Un bon exemple est le projet final de la loi européenne sur l'IA, qui comprend une telle disposition pour les LLM à haut risque. Cependant, nous soutenons que ces exigences ou des exigences similaires ne doivent pas être trop strictes, car les connaissances méthodologiques actuelles pour rendre compte de certains niveaux de durabilité numérique sont sous-développées. De plus, une approche trop stricte inciterait simplement ces entreprises à se relocaliser dans d'autres juridictions pour la formation/interférence en matière d'IA, sans bénéfice net pour le climat. Il s'agira plutôt de fixer une norme qu'il sera intéressant pour les entreprises de respecter (comme une forme de signalisation positive) et qui pourra ainsi gagner en influence grâce à des décisions de consommation conscientes de la part des consommateurs, qui introduiront la durabilité comme un élément de concurrence supplémentaire sur le marché.

4.2.2 Analyse des données d'interaction

Toute mesure de transparence devrait inclure des données d'interaction, c'est-à-dire des informations sur le comportement des utilisateurs par les développeurs de modèles d'IA générative

: Une meilleure compréhension du comportement des utilisateurs par les développeurs de modèles peut améliorer de manière significative l'estimation de la consommation d'énergie pendant l'inférence de l'IA et tout au long du cycle de vie des systèmes d'IA. Comme indiqué plus haut, des études récentes suggèrent que les coûts énergétiques associés aux applications d'IA peuvent rapidement dépasser l'investissement énergétique initial nécessaire à la formation, parfois dans les semaines ou les mois qui suivent le déploiement à grande échelle. Une meilleure compréhension de la manière dont les utilisateurs interagissent avec les systèmes d'IA pourrait non seulement optimiser l'utilisation de l'énergie, mais aussi répondre aux préoccupations en matière de sécurité et à d'autres problèmes critiques associés aux technologies d'IA générative, comme l'ont souligné des universitaires tels qu'Arvind Narayanan et Sayash Kapoor. Ils ont fait valoir que les rapports de transparence sur les données d'interaction rédigés par les déployeurs de l'IA générative sont techniquement réalisables et peuvent être largement automatisés.¹⁸⁶ L'intégration de l'analyse du comportement de l'utilisateur dans le déploiement des systèmes d'IA permettra de créer des solutions d'IA plus efficaces sur le plan énergétique et plus sûres, ce qui contribuera en fin de compte à l'objectif plus large de durabilité à l'ère numérique.

4.2.3 Interface numérique pour les comparaisons avec les consommateurs

Créer une interface web/application facile à utiliser pour permettre des comparaisons transparentes par les utilisateurs finaux

: Une fois qu'une méthodologie commune et la transparence des données clés auront été établies, la Commission pourrait s'inspirer de son récent appel d'offres pour un calculateur permettant d'évaluer l'empreinte carbone des œuvres audiovisuelles.¹⁸⁷ Sur la base d'une méthode de calcul commune (voir le point 1 ci-dessus) et à l'instar du projet de l'UE sur les œuvres audiovisuelles, une application web conviviale permettrait à tous les producteurs et consommateurs

¹⁸⁵ Austin (2023), [Le gouvernement californien Gavin Newsom signe une loi obligeant les grandes entreprises à divulguer leurs émissions | AP News](#).

¹⁸⁶ Narayanan et Kapoor (2023), [Les entreprises d'IA générative doivent publier des rapports de transparence \(aisnakeoil.com\)](#).

¹⁸⁷ Voir : Nouvelles de la Commission (2024), [Un calculateur d'émissions de carbone commun pour le secteur audiovisuel européen](#).

de l'UE de calculer facilement l'empreinte carbone résultant de l'utilisation de modèles de grandes langues spécifiques (pour des raisons privées ou dans le cadre de produits ou de services commerciaux), ce qui faciliterait la comparabilité entre les États membres et permettrait aux Européens de calculer, de contrôler et de réduire l'empreinte carbone des technologies numériques vertes.

À l'avenir, ce mécanisme de transparence pourrait être renforcé par l'approche de l'UE en matière d'écoconception récemment mise à jour dans le règlement (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024, ou être lié à cette approche.¹⁸⁸ Ce règlement étend l'approche de l'écoconception définie à l'origine dans la directive 2009/125/CE en la rendant applicable à la gamme de produits la plus large possible. Son cadre pour l'établissement d'exigences en matière d'écoconception pour les produits durables inclut la possibilité d'un passeport numérique pour les produits. Cela pourrait s'avérer particulièrement pertinent dans la mesure où l'IA générative est de plus en plus intégrée dans les produits physiques dès le départ, comme le montre l'ajout récent par Microsoft d'un bouton dédié à l'IA dans ses claviers Windows et l'intégration prévue par Apple de plusieurs modèles d'IA générative dans les iPhones. Le nouveau règlement sur l'écoconception vise à couvrir l'ensemble du cycle de vie des produits, tout en exigeant la transparence des empreintes carbone. L'introduction de passeports numériques adaptés aux produits basés sur l'IA générative pourrait permettre aux consommateurs, à l'industrie et aux autorités d'accéder plus facilement à l'impact environnemental de ces produits et de le comprendre, conformément à nos suggestions ci-dessus et aux objectifs de la double transition.

4.2.4 Passage à des pratiques de « codage vert »

Encourager publiquement et financièrement le passage à des pratiques de "codage vert" plus légères : Se concentrer sur les aspects physiques de l'impact environnemental de la technologie numérique, tels que le matériel et les centres de données, est à la fois intuitif et visible, ce qui en fait l'un des principaux axes des efforts actuels en matière de durabilité environnementale. Cependant, le domaine de l'optimisation des logiciels, en particulier par le biais de ce que l'on appelle le "codage vert", est un domaine où l'on peut réaliser des gains significatifs avec potentiellement moins d'efforts. Cette approche préconise de rationaliser les bases de code, d'éliminer les lignes de code inutiles et d'éviter d'utiliser sans discernement des logiciels libres lorsque des solutions plus simples et plus efficaces suffiraient. Ces stratégies représentent des solutions faciles à mettre en œuvre pour réduire l'empreinte carbone du secteur numérique, mais elles reçoivent relativement peu d'attention de la part des décideurs politiques et du public. Cet oubli peut être dû à un manque général d'expertise en programmation parmi les observateurs politiques et les fonctionnaires, ce qui conduit à une sous-estimation de l'impact que l'optimisation des logiciels peut avoir sur la durabilité. Encourager publiquement et financièrement un changement d'orientation vers des pratiques de codage plus efficaces et plus écologiques (par exemple en modifiant les règles de passation des marchés) pourrait donc débloquer des avantages environnementaux significatifs, souligner la nécessité d'efforts éducatifs plus larges pour démystifier ce potentiel et promouvoir des pratiques de développement de logiciels plus durables. En effet, des recherches et des incidents récents montrent que l'augmentation

¹⁸⁸ Parlement européen et Conseil (2024), Règlement (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits durables, modifiant la directive (UE) 2020/1828 et le règlement (UE) 2023/1542 et abrogeant la directive 2009/125/CEText présentant de l'intérêt pour l'EEE, PE/106/2023/REV/1, JO L, 2024/1781.

des codes de mauvaise qualité générés par des LLM a accru le potentiel de cyberattaques, par exemple par le biais de bibliothèques hallucinées qui sont automatiquement téléchargées.¹⁸⁹

4.2.5 Recherche sur les puces efficaces, les petits modèles linguistiques et les scénarios d'émissions

Soutien à la recherche sur du matériel d'IA plus économe en énergie, des "modèles de petits langages" et des scénarios d'émissions pilotés par l'IA : Étant donné que le taux actuel de consommation de l'IA et des crypto-monnaies risque de peser lourdement sur le réseau énergétique européen, l'UE devrait financer la recherche et les start-ups qui promettent de créer des technologies d'IA plus économes en énergie et d'adopter des pratiques d'utilisation qui réduisent la consommation d'énergie. À cet égard, les domaines prometteurs, en termes de matériel qui devrait être soutenu et dont les progrès devraient être suivis de près, sont les unités de traitement stochastiques (SPU), l'informatique quantique et les puces informatiques réversibles. De même, la recherche sur l'architecture de l'IA pour les modèles de langage progresse actuellement à grands pas vers le développement de modèles qui sont non seulement puissants, mais aussi plus économes en énergie et adaptés à une plus large gamme d'appareils, y compris les smartphones. Cette transition est évidente dans les avancées récentes telles que les LLM 1-bit de Microsoft et son nouveau modèle compact, Phi-3, et l'OpenELM d'Apple, qui signalent une évolution vers des technologies d'IA plus vertes et plus accessibles. Enfin, le soutien financier devrait s'étendre à la recherche, tant par les universitaires que par les entreprises actives dans ce secteur, sur la conception de scénarios qui évaluent l'impact potentiel de l'expansion de l'IA sur le climat,¹⁹⁰ en utilisant la modélisation quantitative et la consultation d'experts pour explorer différents avenir possibles - une méthode couramment utilisée par les institutions financières pour évaluer les risques et planifier les investissements.

4.2.6 Utiliser l'IA pour optimiser les processus internes de l'UE

L'UE elle-même devrait tirer parti de l'IA pour optimiser ses opérations internes : Fin janvier 2024, la Commission a adopté une communication décrivant sa propre approche stratégique de l'utilisation de l'IA, y compris des actions concrètes sur la manière dont la Commission renforcera les capacités institutionnelles et opérationnelles pour garantir le développement et l'utilisation d'une IA digne de confiance, sûre et éthique.¹⁹¹ En outre, la Commission se prépare également à soutenir les administrations publiques de l'UE dans leur propre adoption de l'IA. Cette réforme devrait être accélérée et transformée en une action plus concrète,¹⁹² tout en veillant à minimiser l'impact environnemental des systèmes d'IA déployés dans le secteur public.¹⁹³ Par exemple, en intégrant l'IA dans ses systèmes de gestion de l'énergie, l'UE pourrait utiliser l'analyse prédictive pour prévoir la demande d'énergie dans ses installations, ce qui permettrait d'ajuster dynamiquement la consommation d'énergie afin de minimiser le gaspillage. En outre, des technologies de construction intelligente pilotées par l'IA, allant de l'éclairage automatisé et des systèmes de chauffage, de

¹⁸⁹ Recherche : [Coding on Copilot : 2023 Data Suggests Downward Pressure on Code Quality \(incl 2024 projections\) - GitClear](#) Incidents : [L'IA hallucine des paquets de logiciels et les développeurs les téléchargent - The Register](#).

¹⁹⁰ Pour cette proposition, voir : Luers et al. (2024), [L'IA va-t-elle accélérer ou retarder la course vers des émissions nettes nulles ? \(nature.com\)](#).

¹⁹¹ Commission européenne (2024), [Communication sur l'intelligence artificielle dans la Commission européenne \(AI@EC\)](#).

¹⁹² Voir aussi : Küsters (2024), [Anticiper l'IA au lieu de la prévenir | cep - Centre for European Policy Network](#).

¹⁹³ Voir : Gabriel et al. (2024), [the-ethics-of-advanced-ai-assistants-2024-i.pdf \(storage.googleapis.com\)](#), chapitre 18.

ventilation et de climatisation à la surveillance avancée de l'isolation, pourraient être déployées dans les propriétés appartenant à l'UE afin de garantir l'efficacité énergétique. En outre, l'IA pourrait améliorer le processus d'approvisionnement de l'UE en analysant de vastes ensembles de données afin d'identifier les fournisseurs et les matériaux les plus durables, réduisant ainsi l'impact environnemental de sa chaîne d'approvisionnement. Cette approche s'aligne non seulement sur les objectifs du Green Deal de l'UE, mais sert également de modèle pour l'intégration de la technologie numérique dans les objectifs de durabilité.

4.3 Recommandations relatives à l'euro numérique

4.3.1 Avons-nous vraiment besoin d'un euro numérique ?

Avant de décider comment concevoir un euro numérique dans le respect de la double transition, la première question à laquelle il faut répondre est de savoir s'il existe un réel besoin d'un nouveau moyen de paiement public pour la zone euro ou si nous devons nous accommoder des nombreuses solutions de paiement publiques et privées existantes. Par exemple, dans notre [cepPolicyBrief](#) sur la proposition de la Commission sur l'euro numérique, nous avons conclu que la BCE et la Commission devraient s'abstenir d'introduire un euro numérique à ce stade puisqu'aucune défaillance du marché ne peut être identifiée et qu'il existe de nombreuses bonnes alternatives de paiement à l'euro numérique. En outre, l'euro numérique n'apporte aucune valeur ajoutée immédiate qui pourrait justifier sa mise en œuvre coûteuse et, à l'heure actuelle, la faisabilité et la viabilité du projet de l'euro numérique ne sont toujours pas satisfaisantes. Ainsi, même si un euro numérique, sous quelque forme que ce soit, contribuait aux objectifs de durabilité de l'UE, il ne serait peut-être pas utile d'en promouvoir la mise en œuvre. En outre, l'émission d'un euro numérique à des fins purement environnementales pourrait être exagérée, car d'autres mesures politiques pourraient être adoptées pour encourager des marchés de paiement plus respectueux de l'environnement.

4.3.2 Avons-nous besoin d'un euro numérique en ligne et hors ligne ?

La BCE et la Commission souhaitent mettre en œuvre l'euro numérique sous deux formes différentes, en ligne et hors ligne. Alors que la version en ligne fonctionnera principalement comme les méthodes de paiement en ligne et numériques existantes, la version hors ligne offre aux utilisateurs de l'euro numérique une méthode de paiement reproduisant de nombreuses caractéristiques de l'argent liquide. Il convient de se demander si les deux variantes sont vraiment nécessaires, non seulement pour des raisons environnementales, mais aussi pour d'autres raisons. Étant donné que la version hors ligne reproduit essentiellement les espèces et que nous ne voyons pas de réelle valeur ajoutée par rapport aux pièces et aux billets, il pourrait être intéressant de se concentrer uniquement sur une version en ligne. Cela réduirait la complexité et la nécessité de mettre en place plusieurs infrastructures et systèmes au niveau des banques centrales, des banques commerciales, des prestataires de services de paiement, des commerçants et des utilisateurs finaux. En outre, de nombreux politiciens ⁽¹⁹⁴⁾ et

¹⁹⁴ Par exemple, dans sa proposition de règlement sur le cours légal des billets et pièces en euros [COM(2023) 364], la Commission avertit que "la croissance des paiements électroniques [...] a entraîné une baisse générale des paiements en espèces et la réduction des réseaux de distributeurs automatiques de billets (DAB)". Elle observe donc des risques pour les citoyens qui ont accès à l'argent liquide et propose d'accorder à l'argent liquide le statut de monnaie légale, dans le but de garantir que la forme physique de la monnaie centrale reste présente, disponible et acceptée par tous les résidents et toutes les entreprises de la zone euro.

banquiers centraux ⁽¹⁹⁵⁾ ont demandé que les espèces physiques aient un avenir et ne soient pas abandonnées, pour de nombreuses raisons ⁽¹⁹⁶⁾. Ainsi, dans un avenir prévisible, il semble peu probable qu'il y ait un besoin inhérent d'une alternative numérique (hors ligne) à l'argent physique. En outre, nous assistons déjà à une intensification des efforts visant à améliorer l'empreinte écologique de l'argent liquide. Par exemple, la BCE a déjà introduit (1) des sources de coton durables dans la fabrication des billets en euros, (2) un revêtement protecteur sur les petites coupures afin d'augmenter leur durée de vie et (3) une interdiction d'éliminer les déchets de billets dans les décharges. ^{197,198} En outre, dès 2013, la Commission a publié une communication sur les questions liées à la poursuite de l'émission des pièces de 1 et 2 centimes d'euro [COM(2013) 281, voir [cepPolicyBrief](#)], qui envisageait, entre autres, un retrait progressif des petites pièces. Dans un premier temps, l'émission de petites pièces cesserait. Ensuite, après quelques années, ces pièces n'auraient plus cours légal. La récente poussée inflationniste pourrait être une bonne occasion de réfléchir à nouveau à la suppression de ces petites pièces à court ou moyen terme (également pour des raisons de durabilité).

4.3.3 Choisir la bonne conception technique

Si la Commission et la BCE parviennent néanmoins à la conclusion qu'un euro numérique est nécessaire en tant que nouvelle monnaie numérique pour la zone euro (dans une ou deux versions), la conception technique de l'euro numérique sera le facteur le plus crucial pour déterminer si la MNBC peut ou non être considérée comme durable en termes écologiques. Comme nous l'avons montré plus haut, les solutions centralisées présentent plus d'avantages que les solutions décentralisées à cet égard. Par conséquent, l'expérimentation et les tests effectués par la BCE devraient se concentrer principalement sur les premières. En ce qui concerne les solutions centralisées, les discussions se multiplient sur l'utilisation de ce que l'on appelle les "systèmes de règlement brut en temps réel (RTGS)", comme le système TARGET de règlement instantané des paiements (TARGET Instant Payment Settlement - TIPS). ¹⁹⁹ TIPS, qui a été mis en œuvre par l'Eurosystème en 2018, est un service d'infrastructure de marché permettant d'effectuer des paiements en temps réel, en quelques secondes, 24 heures sur 24 et tous les jours de l'année. ^{200,201} Les éléments fournis par la Banque d'Italie montrent qu'"un euro numérique basé sur le TIPS pourrait marquer une première étape vers une réduction plus générale des coûts environnementaux des solutions et instruments de paiement". Dans son examen, la Banque s'est concentrée sur une solution technologique à la fois rentable et à faible empreinte écologique, et a

¹⁹⁵ Par exemple, la Bundesbank allemande déclare que l'argent liquide et l'euro numérique coexisteront et qu'il complétera mais ne remplacera pas l'argent liquide [<https://www.bundesbank.de/de/aufgaben/unbarer-zahlungsverkehr/digitaler-euro/faq-digitaler-euro/>].

¹⁹⁶ Même la Suède, qui a été l'un des premiers promoteurs des moyens de paiement numériques publics et privés, craint peu à peu la disparition de l'argent liquide, et sa banque centrale plaide en faveur de mesures de sauvegarde qui garantissent un approvisionnement de base en espèces. Ce changement d'état d'esprit est dû à plusieurs facteurs. Il s'agit notamment de considérations liées à l'inclusion financière et à la protection de la vie privée, mais aussi d'aspects tels que l'existence d'un système de paiement sûr et généralement disponible, qui fonctionnerait en temps de crise ou lorsque les moyens de paiement numériques sont, par exemple, confrontés à des cyberattaques ou à des coupures d'électricité. Ainsi, les infrastructures monétaires pourraient servir d'option de repli, par exemple en cas de troubles géopolitiques croissants [Stefan Krempel (2024) Missing Link : Karten-Pionier Schweden entdeckt die Bedeutung von Bargeld neu, 5 mai 2024].

¹⁹⁷ BCE (2023), Product Environmental Footprint study of euro banknotes as a payment instrument, décembre 2023.

¹⁹⁸ En mai 2024, Piero Cipollone, membre du directoire de la BCE, a réitéré l'engagement de la BCE à prendre des mesures pour réduire l'empreinte environnementale des billets de banque et des systèmes de paiement [BCE (2024), Europe's tragedy of the horizon : the green transition and the role of the ECB, Discours de Piero Cipollone au Festival dell' Economia di Trento, 26 mai 2024].

¹⁹⁹ Giaglis, G. et al. (2021), Central Bank Digital Currencies and a Euro for the Future.

²⁰⁰ <https://www.ecb.europa.eu/paym/target/tips/html/index.en.html>.

²⁰¹ Wang, H. (2023).

choisi une option qui, d'une part, " réutilise " l'infrastructure existante de l'Eurosystème et, d'autre part, évite les mécanismes d'extraction typiques de nombreux DLT (voir également le tableau 4).²⁰²

Tab. 4: Empreinte carbone d'un hypothétique euro numérique basé sur le TIPS

Empreinte carbone d'un euro numérique hypothétique basé sur le TIPS	
Consommation totale d'électricité par an	170687 kwh
CO2 total émis par an	86,367 kgCO2
CO2 émis par paiement unique	0,00027g de CO2

Source : Urbinati, E. et al. (2021).

De même, un article de Tiberi, P. (2021), qui a estimé l'empreinte carbone du système TIPS en 2019 et l'a comparée à d'autres infrastructures de paiement, montre le potentiel environnemental de TIPS. L'auteur a conclu, par exemple, que l'empreinte carbone du bitcoin était environ 40 000 fois supérieure à celle du système TIPS à l'époque²⁰³ en raison du mécanisme de consensus décentralisé à forte intensité énergétique de la crypto-monnaie. En outre, il a déclaré que les niveaux de consommation d'énergie du TIPS étaient également supérieurs à ceux de nombreuses autres infrastructures de paiement, bien qu'à un degré moindre.²⁰⁴

4.3.4 Choisir les bonnes sources d'énergie pour alimenter l'écosystème de l'euro numérique

Les décisions prises par la BCE sur la conception technique appropriée et respectueuse de l'environnement d'un euro numérique devraient aller de pair avec des réflexions sur le bon choix des sources d'énergie pour alimenter les écosystèmes de l'euro numérique. Du point de vue de la durabilité, une configuration technique centralisée favorable donnerait à la BCE et aux banques centrales nationales de la zone euro la possibilité d'avoir leur mot à dire dans la réduction des niveaux de consommation d'énergie et de l'impact sur l'environnement en général. La BCE a la possibilité d'intégrer des objectifs environnementaux dans ses efforts de développement des MNBC, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en optimisant la consommation d'énergie. Elle doit saisir cette opportunité. Quand

- en optant pour une solution basée sur la DLT, ils pourraient et devraient orienter la localisation des participants ("nœuds") des infrastructures numériques de l'euro vers des lieux géographiques où les sources d'énergie renouvelables sont abondantes ou où il y a une surproduction d'énergie non renouvelable qui, si elle n'est pas absorbée, sera gaspillée.²⁰⁵
- choisir les participants à l'écosystème de l'euro numérique, ils devraient faire dépendre la sélection de l'utilisation par les participants de sources d'énergie renouvelables et des efforts déployés pour réduire leur empreinte carbone liée à l'énergie, et inclure des incitations à choisir des lieux où ces énergies renouvelables peuvent être produites le plus efficacement, par exemple dans les régions les plus froides, ou des critères d'efficacité énergétique. Cela peut impliquer l'intégration de critères connexes dans des procédures de passation de marchés spécifiques. De cette manière, la BCE peut

²⁰² Urbinati, E. et al. (2021), A digital euro : a contribution to the discussion on technical design choices (No. 10), Banque d'Italie, Direction générale des marchés et des systèmes de paiement.

²⁰³ L'auteur précise que l'écart serait un peu moins important car il n'y a pas de reconnaissance complète des différents volumes de transactions entre Bitcoin et TIPS. Toutefois, les résultats ne changeraient pas beaucoup "car l'augmentation marginale des émissions par transaction supplémentaire [lors de l'utilisation du TIPS] est très faible".

²⁰⁴ Tiberi, P. (2021), The carbon footprint of the Target Instant Payment Settlement (TIPS) system : a comparative analysis with Bitcoin and other infrastructures. Document de travail de la Banque d'Italie sur les marchés, les infrastructures et les systèmes de paiement, (5).

²⁰⁵ Agur, M. I. et al. (2022).

déclencher une concurrence entre les acteurs intéressants qui proposent les solutions les plus durables pour soutenir le fonctionnement de l'euro numérique. En fin de compte, cela devrait englober des acteurs tels que les vendeurs de matériel produisant des appareils, les centres de données et les fournisseurs de services en nuage permettant le traitement et le stockage des transactions de paiement, et les sociétés de logiciels développant des services frontaux, des portefeuilles numériques en euros et des interfaces d'application.^{206,207}

Lorsqu'il n'est pas de la compétence directe de la BCE de décider des facteurs environnementaux parce que ces décisions sont prises par les entreprises de l'écosystème de l'euro numérique elles-mêmes - telles que les nombreux prestataires de services de paiement (PSP) qui distribueront l'euro numérique et offriront des services de base et avancés en euro numérique - les législateurs pourraient envisager d'émettre des recommandations exigeant que ces entreprises intègrent des garanties similaires en matière de consommation d'énergie dans leurs achats et leurs processus.

Si ces aspects sont pris en compte à un stade précoce, dans tous les domaines pertinents pour le développement de l'écosystème numérique de l'euro, et utilisés comme base pour développer des idées, des solutions et des normes innovantes et durables, cela pourrait également constituer une source d'apprentissage pour les moyens de paiement existants. Il pourrait en résulter des retombées fructueuses qui rendraient l'ensemble des marchés européens des paiements plus respectueux de l'environnement. Ou, comme l'a dit le G7 : "Les MNBC offrent la possibilité d'indiquer comment les futurs écosystèmes de paiement [...] sont conçus pour une efficacité énergétique optimale, notamment par l'utilisation de sources d'énergie neutres en carbone et durables, tout en atteignant les objectifs nécessaires en matière de fonctionnalité, de performance et de résilience"²⁰⁸.

4.3.5 Réfléchir à une stratégie de gestion des déchets électroniques à l'épreuve du temps

Tout nouveau moyen de paiement est susceptible de produire de nouveaux déchets électroniques (e-waste). Le bitcoin est un mauvais exemple à cet égard. De Vries et Stoll (2021) ont constaté que les appareils nécessaires au minage du bitcoin n'ont qu'une durée de vie moyenne de 1,3 an avant d'être mis au rebut et que les déchets électroniques générés par une seule transaction en bitcoin sont comparables à la mise au rebut de deux iPhone 13 Minis.²⁰⁹ Ainsi, au-delà des considérations liées à la source d'énergie pure, les réflexions doivent également porter sur la manière d'éviter les déchets électroniques. Ces réflexions peuvent inclure la possibilité d'utiliser des appareils, par exemple des smartphones, déjà utilisés par les utilisateurs d'euros numériques à d'autres fins, évitant ainsi la production de composants ou d'infrastructures en double. En outre, dès le départ, il doit y avoir une stratégie de recyclage fiable et à l'épreuve du temps pour les instruments de paiement en euros numériques utilisés par les utilisateurs d'euros numériques ainsi que pour les nombreux éléments de l'infrastructure numérique.

4.3.6 Être transparent sur l'impact environnemental d'un euro numérique

S'il est mis en place, l'euro numérique sera un moyen de paiement public totalement nouveau pour la zone euro. Il n'existe donc pas encore de valeurs empiriques sur son empreinte écologique et les informations provenant d'autres juridictions qui ont déjà émis des monnaies numériques de banque

²⁰⁶ Agur, M. I. et al. (2022).

²⁰⁷ Il peut s'agir d'obliger tout contractant à appliquer les principes de l'ingénierie logicielle écologique.

²⁰⁸ Sunak, R., & Bailey, A. (2021), Public Policy Principles for Retail Central Bank Digital Currencies (MNBCs), G7 UK.

²⁰⁹ De Vries, A., & Stoll, C. (2021), Bitcoin's growing e-waste problem. Resources, Conservation and Recycling, 175, 105901.

centrale de détail sont rares. Il est donc logique de mettre en place un système de suivi de la viabilité de l'écosystème de l'euro numérique tout au long de la chaîne de valeur, pour l'ensemble du cycle de vie et de manière continue et régulière. À cet égard, la BCE devrait jouer un rôle de pionnier en rendant son empreinte carbone liée à l'euro numérique transparente dès sa première émission, de manière exhaustive, et en établissant éventuellement une norme pour les déclarations ultérieures des prestataires de services de paiement et des autres participants au marché. Ces informations et cette transparence pourraient servir de catalyseur pour des améliorations au fil du temps, réduisant ainsi l'impact négatif potentiel de l'euro numérique sur l'environnement. Un suivi étroit pourrait, en outre, assurer la visibilité de longue date du sujet au niveau politique et donc, en pratique, fournir une fonction de contrôle importante. Lors de l'élaboration de ces recommandations ou exigences en matière de transparence et de divulgation, des enseignements pourraient être tirés de l'expérience acquise dans le cadre d'exigences similaires qui ont été ou seront bientôt adoptées en vertu du règlement sur les marchés des crypto-actifs [MICAR, [\(UE\) 2023/1114](#), voir [ceplinput](#)] au niveau 2 (voir l'encadré 1).

Encadré 1 : Informations sur l'impact environnemental des crypto-actifs dans le cadre du MICA

En vertu du règlement MICA [\(UE\) 2023/1114](#), les personnes qui rédigent des livres blancs de type prospectus sur les crypto-actifs doivent inclure dans ces livres blancs des informations sur "les principales incidences négatives sur le climat et d'autres incidences négatives liées à l'environnement du mécanisme de consensus utilisé pour émettre le crypto-actif". L'Autorité européenne des marchés financiers (AEMF) est chargée de préciser le contenu, les méthodes et la présentation de ces informations et de définir des indicateurs de durabilité en adoptant des projets de normes techniques réglementaires. Pour ce faire, l'ESMA doit notamment prendre en compte les différents mécanismes de consensus, leurs structures d'incitation et leur consommation d'énergie, ainsi que la production de déchets et d'émissions de gaz à effet de serre.* Dans un premier document de discussion, publié en octobre 2023, l'ESMA a proposé**

- un ensemble ciblé d'informations obligatoires, y compris des mesures sur la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre des catégories 1 et 2, la production de déchets et l'impact sur les ressources naturelles de l'utilisation d'équipements par les nœuds du réseau DLT,
- une série d'indicateurs supplémentaires, mais (initialement) facultatifs, qui comprennent des informations granulaires sur le bouquet énergétique et l'intensité carbonique de l'énergie utilisée ou sur les émissions de gaz à effet de serre du champ d'application 3.

Le 3 juillet 2024, l'ESMA a publié les projets de normes techniques. Ces normes comprennent des informations obligatoires sur les impacts négatifs sur le climat et d'autres impacts négatifs liés à l'environnement, englobant

- des informations générales sur la crypto-monnaie et sur les caractéristiques des mécanismes de consensus,
- un indicateur clé obligatoire sur la consommation d'énergie et, le cas échéant, des indicateurs clés supplémentaires sur l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES), et
- une section sur les sources et les méthodologies utilisées pour calculer ces indicateurs clés.

En outre, les projets de normes techniques incluent, pour les crypto-actifs dont la consommation annuelle d'énergie est plus élevée, plusieurs indicateurs clés supplémentaires, notamment

- le ratio annuel de consommation d'énergie renouvelable,
- la consommation moyenne d'énergie exprimée par transaction,
- la production d'émissions de gaz à effet de serre exprimée par transaction, et
- les émissions annuelles de GES liées à l'utilisation de sources d'énergie directes et indirectes.

En outre, les rédacteurs de livres blancs et les fournisseurs de services de crypto-actifs peuvent inclure volontairement plusieurs indicateurs supplémentaires sur le climat et d'autres questions liées à l'environnement, par exemple sur la production de déchets ou l'utilisation des ressources naturelles.

Dans ce contexte, il est essentiel que les émetteurs de crypto-actifs et les fournisseurs de services de crypto-actifs (CASP) identifient et révèlent tout impact négatif potentiel sur le climat ou l'environnement.****

* Art. 6(12), 19(11), 51(15) et 66(6) MiCAR.

** ESMA (2023), *Consultation Paper, Technical Standards specifying certain requirements of Markets in Crypto Assets Regulation (MiCA) - second consultation paper*, ESMA75-453128700-438, 5 octobre 2023.

*** ESMA (2024) *Final Report Draft Technical Standards specifying certain requirements of the Markets in Crypto Assets Regulation (MiCA) - second package*, ESMA75-453128700-1229, 3 juillet 2024, p. 178 et s.

**** Récital 7 MiCAR.

À cet égard, il convient de saluer le fait que le G7 a déjà pris un engagement fort en matière de transparence en déclarant que, lorsqu'elles communiquent des informations relatives au climat dans leurs rapports, les banques centrales devraient également inclure des informations sur l'impact environnemental de leurs opérations en ce qui concerne leurs MNBC.²¹⁰ En outre, il pourrait être utile d'établir une méthodologie commune et bien fondée pour calculer l'impact environnemental de tous les moyens de paiement privés et publics, y compris un éventuel euro numérique, afin de rendre leurs empreintes écologiques respectives transparentes et comparables.

²¹⁰ Sunak, R. et Bailey, A. (2021).

5 Conclusion : Vers un avenir numérique respectueux de l'environnement

L'examen de l'IA générative et de l'euro numérique dans le contexte de la stratégie de double transition de l'UE met en évidence l'interaction complexe et finalement imprévisible entre la numérisation et la décarbonisation. Si les technologies numériques sont très prometteuses en termes d'optimisation de l'utilisation des ressources, elles posent également des défis notables en termes de consommation d'énergie et de déchets électroniques. Nos études de cas montrent que les points de vue optimistes des législateurs européens sur les avantages environnementaux de l'IA et la conception des monnaies numériques négligent souvent des preuves empiriques essentielles. Pour assurer une transition réussie entre les deux, les décideurs politiques doivent adopter une approche plus holistique qui concilie le progrès technologique et les mesures de protection de l'environnement. Dans cette dernière partie, nous résumons les principaux résultats de nos deux études de cas et les situons dans la bataille géopolitique plus large de l'UE pour l'autonomie stratégique, qui nécessite de concilier les objectifs d'une Europe verte et d'une Europe numérique.

Tout d'abord, la première étude de cas a clairement montré que l'impact environnemental des modèles d'IA générative modernes découle principalement de leur importante consommation d'énergie et de leurs émissions de carbone pendant les phases d'apprentissage et d'inférence. Jusqu'à présent, les décideurs politiques et la plupart des recherches se sont concentrés sur la phase de formation en raison de sa durée tangible et fixe et des ressources informatiques dédiées. La croissance exponentielle de la taille des modèles et l'augmentation correspondante de la consommation d'énergie témoignent de l'escalade récente des exigences en matière de calcul. La dernière vague de progrès dans les performances de l'IA est en effet principalement due à la mise à l'échelle des ressources informatiques. En outre, le rôle des centres de données et de la fabrication de puces amplifie encore l'empreinte environnementale, car ces infrastructures nécessitent d'importantes ressources en énergie et en eau, contribuant ainsi aux émissions globales. Toutefois, à mesure que l'IA générative s'intègre davantage dans les applications quotidiennes, telles que les ordinateurs ou les iPhones mis à jour, l'étape de l'inférence mérite également une attention particulière. Les prochaines normes élaborées pour la mise en œuvre de la loi européenne sur l'IA, qui comprend des exigences environnementales minimales pour les modèles d'IA, devraient prendre en compte l'ensemble de l'impact direct de ces systèmes, c'est-à-dire à la fois pour la formation et l'inférence.

Toutefois, il est important que ces exigences n'entravent pas les ambitions de l'UE d'accroître sa compétitivité et d'attirer les jeunes pousses de l'IA, en raison des défis méthodologiques actuels pour mesurer les impacts environnementaux de manière exhaustive. Pour résoudre ces problèmes, le présent document propose une approche à trois niveaux pour l'évaluation comparative de la durabilité de l'IA générative. La première couche se concentre sur la consommation directe d'énergie pendant les phases d'apprentissage et d'inférence, ce qui favorise la mesure en temps réel et le développement d'algorithmes et de matériel à faible consommation d'énergie. La deuxième couche prend en compte l'impact environnemental indirect des infrastructures de soutien, telles que les centres de données et l'extraction des matières premières. La troisième couche examine les implications sociétales plus larges et les effets de rebond potentiels du déploiement de la genAI. En ciblant d'abord les normes et les politiques au premier niveau, puis en intégrant progressivement des impacts plus complexes sur le cycle de vie et la société à mesure que la compréhension méthodologique progresse, cette approche progressive évite la "présomption de connaissance" hayékienne et aligne les deux objectifs de transition de l'UE.

La deuxième étude de cas sur l'euro numérique a montré que la comparaison de l'impact environnemental des nombreux moyens de paiement disponibles sur les marchés des paiements de l'UE n'est pas une tâche facile et ne peut généralement pas être réalisée de manière directe et objective. L'étude montre toutefois que les systèmes de cartes de crédit sont généralement beaucoup plus performants, en termes de consommation d'électricité, que les espèces et surtout que les crypto-monnaies comme le bitcoin. Cependant, lorsqu'ils sont comparés aux crypto-monnaies autorisées non basées sur le POW, les systèmes de cartes de crédit sont généralement perdants. L'étude a ensuite examiné si la BCE, la Commission et le G7 surveillent correctement le développement d'un euro numérique et des MNBC en général du point de vue de la durabilité. Elle montre que les trois institutions le font. Toutefois, si l'on compare ce facteur à d'autres facteurs de conception incrémentaux, il est actuellement plutôt marginal. Par exemple, la configuration technique d'un euro numérique potentiel, qui est cruciale pour déterminer si la MNBC sera ou non durable en termes écologiques, est encore ouverte et n'a pas encore été décidée. La section suivante a examiné les facteurs qui détermineront l'impact environnemental d'un euro numérique. Elle a souligné qu'au-delà de sa conception technique, d'autres aspects jouent également un rôle important, tels que l'universalité de l'accès, la question de savoir si la MNBC, en tant que nouveau moyen de paiement, complétera plutôt qu'elle ne remplacera d'autres moyens, la caractéristique de la cascade (inversée) ou l'existence de deux variantes de l'euro numérique (en ligne et hors ligne).

Dans l'ensemble, nos résultats mettent en évidence un dilemme inconfortable. À l'heure où la technologie est l'élément clé d'une compétition géopolitique mondiale conduisant à des mesures protectionnistes et à des délocalisations, la compétitivité de l'Europe dans les technologies de pointe telles que l'IA générative et les monnaies numériques doit être renforcée, et sa dépendance vis-à-vis de l'étranger réduite, si nous voulons préserver notre souveraineté. Toutefois, comme l'a montré le présent document, l'adoption à grande échelle de ces deux technologies implique également des retombées environnementales difficiles à quantifier qui pourraient contrecarrer l'élan en faveur d'une révolution verte, qui est également nécessaire face au changement climatique rapide qui comporte ses propres dangers. Comme l'a fait remarquer Fabio Panetta, ancien membre du directoire de la BCE, dans une conférence récente, la stratégie technologique actuelle de l'UE, que nous avons qualifiée de "transition jumelle", crée des "dilemmes politiques difficiles à résoudre", puisque, par exemple, "la transition verte serait accélérée en se concentrant sur l'adoption rapide de technologies à faible coût, principalement produites en Chine, mais au prix d'une dépendance stratégique croissante".²¹¹ Ce dilemme et les compromis sous-jacents de chaque mesure politique adoptée dans le cadre de la stratégie de "double transition" doivent être abordés de manière beaucoup plus directe par la future Commission. Par exemple, le dernier rapport sur l'état de la décennie numérique maintient toujours que la transformation numérique et l'adoption accrue des technologies par les entreprises et les citoyens ont le "potentiel de réduire les émissions totales de gaz à effet de serre de 15 % à 20 % avant 2030, dans l'ensemble de l'économie".²¹²

C'est ignorer certains conflits et compromis que l'on peut déjà esquisser aujourd'hui, malgré toutes les incertitudes et le caractère essentiellement imprévisible des effets de rebond. Dans le cas de l'IA, trois conflits simultanés peuvent être identifiés : entre l'innovation en matière d'IA et la répartition équitable des ressources ; entre l'équité intergénérationnelle et intragénérationnelle ; et entre

²¹¹ Fabio Panetta (2024), The future of Europe's economy amid geopolitical risks and global fragmentation, Université de Rome, p. 11, fn. 53.

²¹² Le rapport est disponible ici : [Deuxième rapport sur l'état de la décennie numérique \(europa.eu\)](https://europa.eu).

l'environnement, la société et l'économie.²¹³ Dans le cas des MNBC, il existe également des compromis sous-jacents entre le désir, d'une part, d'une forte inclusion financière, d'un niveau élevé de protection de la vie privée, d'une concurrence entre les PSP pour les utilisateurs d'euros numériques et d'une large disponibilité des nouveaux moyens de paiement et, d'autre part, la réalisation d'objectifs de durabilité. Notre objectif n'était pas de prédéterminer ces choix normatifs, mais de mettre en évidence le conflit sous-jacent qui est généralement omis dans les discours et les documents de l'UE et de reconnaître que l'IA et les MNBC ont des coûts environnementaux et, dans la mesure du possible, d'estimer ces coûts sur la base des premières preuves empiriques qui émergent. Nous espérons ainsi que l'environnement ne sera plus relégué au second plan dans la poussée numérique de l'UE et qu'une discussion plus juste et plus objective pourra avoir lieu sur les priorités de la prochaine Commission et sur la poursuite probable de la double transition verte et numérique.

²¹³ Voir : van Wynsberghe, A. (2021), Sustainable AI : AI for sustainability and the sustainability of AI. AI Ethics 1, pp. 213-218.

**Auteurs :**

Anselm Küsters, LL.M., chef de la division Numérisation et nouvelles technologies

kuesters@cep.eu

Anastasia Kotovskaia, LL.M., Chef du département Marchés financiers et technologies de l'information

kotovskaia@cep.eu

Philipp Eckhardt, chef de la division Marchés financiers et technologies de l'information

eckhardt@cep.eu

Traduction : Victor Warhem, warhem@cep.eu

Centrum für Europäische Politik FREIBURG | BERLIN

Kaiser-Joseph-Straße 266 | D-79098 Freiburg

Schiffbauerdamm 40 Raum 4315 | D-10117 Berlin

Tél. + 49 761 38693-0

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

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