

# Bitcoin: Efficience énergétique des cryptopaiements

Michel KHAZZAKA\*

khazzaka@valuechain.pro

20 avril 2022

## RÉSUMÉ

Bitcoin a introduit une version cryptographique de la monnaie de pair à pair qui permet d'envoyer des paiements en ligne directement d'une partie à une autre sans passer par une institution financière. De nombreuses études récentes ont évalué et critiqué la consommation d'énergie de Bitcoin<sup>1</sup> à travers son mécanisme de consensus par preuve de travail (*Proof of Work*, PoW) sans évaluer son efficience par rapport au système de paiement électronique classique.

En nous appuyant sur la science physique, les sciences de l'information et les sciences économiques, nous calculons et comparons la consommation d'énergie et définissons l'efficience énergétique du système de paiement monétaire actuel et du système de cryptopaiement Bitcoin. Nous démontrons que Bitcoin consomme 56 fois moins d'énergie que le système classique, et que même au niveau de la transaction, la PoW s'avère 1 à 5 fois plus efficace sur le plan énergétique. Lorsque la couche Lightning de Bitcoin est prise en compte et comparée au système de paiement instantané, Bitcoin gagne de manière exponentielle en capacité et en efficience, s'avérant jusqu'à un million de fois plus efficace par transaction que les paiements instantanés.

## INTRODUCTION

Bitcoin est conçu et construit pour fonctionner comme une monnaie mondiale et un système de paiement en ligne. C'est sa proposition de valeur déclarée à la 1ère phrase du résumé du livre blanc du Bitcoin : “*Une version d'un système de paiement purement pair-à-pair permettrait des paiements en ligne*”. Alors que le Bitcoin représente encore  $\approx 42\%$  de la capitalisation boursière totale des cryptomonnaies, nombre de ses détracteurs continuent de critiquer son mécanisme de consensus preuve de travail (PoW) l'accusant d'être avide de pouvoir jusqu'à la mégalomanie. La banque centrale des Pays-Bas DNB a comparé sa consommation d'énergie à celle d'un pays entier

comme le Danemark ou les Pays-Bas dans le papier de la De Nederlandsche Bank intitulé “*L'empreinte carbone du Bitcoin*”<sup>2</sup>. Bien que la plupart<sup>3</sup> des banques centrales ne reconnaissent pas le Bitcoin comme une monnaie légale, elles sont pourtant convaincues des capacités de la technologie de registre distribué<sup>4</sup> (DLT) dans les paiements, la banque et la finance. Le document du DNB n'a pas comparé l'efficience énergétique de la technologie PoW de Bitcoin avec des composantes du système monétaire et de paiement classique. Ce qu'il faut, c'est une évaluation correcte des fonctions de Bitcoin et de leur consommation d'énergie par rapport à leurs homologues dans les systèmes monétaires et de paiement électroniques classiques. Nombreux sont

---

<sup>1</sup> En mars 2022, le règlement de l'UE sur les marchés des crypto-actifs (MiCA) a discuté de l'interdiction totale des crypto-actifs basés sur la preuve de travail pour les allégations d'inefficacité énergétique.

<sup>2</sup> Par les auteurs Juan Pablo Trespalacios et Justin Dijk, 2021

<sup>3</sup> Les banques centrales du Salvador et de la République centrafricaine ont reconnu le Bitcoin comme monnaie ayant cours légale, d'autres pays ont des réglementations qui reconnaissent le Bitcoin comme analogue aux devises étrangères telles que la Russie.

<sup>4</sup> Voir notre Glossaire des Cryptopaiements publié en 2020 par France Payments Forum (en français) pour la différence entre blockchain et DLT ainsi que la définition de la monnaie légale etc.

ceux qui se sont attaqués à ce défi sans le relever. Changpeng Zhao, le fondateur de Binance, a récemment demandé des données sur la consommation d'énergie des paiements par rapport aux crypto-monnaies et l'Institut Sapiens, le think « tech » français, a recommandé dans sa publication “*Bitcoin, totem & tabou*” de réaliser ce travail : “*l'industrie bancaire, dont le coût énergétique est considérable mais jamais évalué, reconnu, ni publié. Il serait intéressant de calculer le coût énergétique du secteur bancaire...*”.

Les faiblesses des études précédentes sont les suivantes :

~ **Utilisation de chiffres inexacts ou de méthodologies incomplètes** : par exemple, le Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), qui est basé sur une moyenne mondiale des prix de l'électricité en USD et une distribution moyenne du matériel minier, donne des résultats inexacts variant entre -50 % (limite inférieure) et +120% (limite supérieure). Il s'agit d'une limitation connue de la méthodologie **CBECI**, outre le fait qu'elle ne permet pas de comparer l'efficacité de deux systèmes similaires. Cet article adressera ces deux problèmes.

~ **Position souvent partielle ou anti-Bitcoin** et ne tenant généralement pas compte à la fois des systèmes monétaires et des systèmes de paiement. Par exemple, le document de la banque centrale DNB “*L'empreinte carbone du Bitcoin*” compare la consommation d'énergie du Bitcoin au seul système de paiement par carte de débit en se basant sur l'indice de Cambridge et l'étude<sup>5</sup> “*The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth*”: Pourtant, les paiements par carte ne sont qu'une étape intermédiaire de la transaction de paiement, ils fournissent principalement une autorisation de transaction et nécessiteront au moins une compensation et un règlement interbancaires ultérieurs pour compléter la finalité de la transaction. En revanche, une transaction en bitcoin est définitive et couvre les étapes de bout en bout de la transaction, la comparaison est donc très partielle.

Il est essentiel de comparer la consommation énergétique du Bitcoin avec tous les aspects du système de paiement monétaire classique. Il s'agit de la gestion des billets et des pièces dans les distributeurs automatiques de billets, des paiements par carte, des paiements aux points de vente (POS), de la consommation d'énergie des services bancaires et interbancaires, etc. (voir MÉTHODOLOGIE ci-dessous)

Nous nous sommes efforcés dans cette recherche de répondre mathématiquement et scientifiquement à tous ces défis au profit des décideurs, des chercheurs, des politiciens, des législateurs et des représentants de l'industrie.

## APPROCHE SCIENTIFIQUE

Afin d'étudier la consommation énergétique du système de cryptomonnaie Bitcoin par PoW et du système électronique classique, nous commençons par mettre en jeu les équations mathématiques et scientifiques qui seront utilisées par la suite.

En physique, le *travail* est l'énergie transférée vers ou depuis un système via l'application d'une *force* le long d'un déplacement dans l'espace-temps<sup>6</sup>. Dans notre cas, le *travail* d'un paiement consiste à transférer un montant d'une valeur *monétaire* d'un *payeur* à un *payé* le long d'un déplacement dans le *temps*. Notez que par nature une transaction électronique (*notée Tx*) peut parcourir le globe en quasi temps-réel donc la notion de déplacement en *distance* mesurée en *kilomètre* a un poids moindre dans l'équation par rapport au déplacement en *temps* qui aura plus de poids dans l'équation. Le *temps* est ici l'intervalle de temps  $\delta t$  nécessaire pour terminer le *travail* de paiement.

Un *travail* de paiement consiste à transférer un montant d'une valeur appelée *monnaie* d'un *payeur* à un *payé* le long d'un déplacement dans le *temps*. [A]

La force physique<sup>7</sup> appliquée est fournie principalement par une force électrique provoquant

<sup>5</sup> La recherche utilisée par DNB pour critiquer le PoW se termine en fait en déclarant : « *Alors que leur consommation d'énergie est, en effet, massive, en particulier par rapport au nombre de transactions qu'ils peuvent opérer, nous avons constaté qu'ils ne représentent pas une grande menace pour le climat, principalement parce que la consommation d'énergie des blockchains PoW n'augmente pas considérablement lorsqu'elles traitent plus de transactions* ». Mais la banque centrale semble avoir manqué ce détail.

<sup>6</sup> Dans sa forme la plus simple, il est souvent représenté comme le produit de la force et du déplacement.

<sup>7</sup> La *puissance* et l'*énergie* sont des grandeurs scalaires à l'opposé de la forme vectorielle de la *force*.

un différentiel d'énergie. À partir de la deuxième loi de Newton, on peut montrer que le *travail* sur un corps libre (sans champs) et rigide (sans degrés de liberté internes), est égal à la variation de l'énergie cinétique  $E_k$  correspondant à la vitesse linéaire et à la vitesse angulaire de ce corps  $W = \Delta E_k$ , où l'*énergie* est la propriété quantitative qui doit être transférée au système pour effectuer un travail (et/ou pour le chauffer)<sup>8</sup>. Il est important d'insister sur le fait que l'énergie est une quantité conservée ; la loi de conservation de l'énergie stipule que l'énergie peut être convertie en forme, mais non créée ou détruite. L'énergie, comme le travail, se mesure en Joules dans le système international<sup>9</sup> mais peut aussi être mesurée en *Watt × heure* ou kWh, soit 1000Wh<sup>10</sup>. La *Puissance* est la quantité d'*énergie* transférée ou convertie par unité de *temps* :

$$Power = \frac{Energy}{Time} = \frac{dW}{dt} = \bar{F} \cdot \bar{v} \quad [0]$$

La puissance est mesurée en Watt, joules par seconde, mais aussi en watt-heure/jour ou en térawatt-heure par an (TWh/an), notamment lorsqu'il s'agit de quantifier la puissance électrique d'un centre de données ou d'un pays. Par exemple, l'énergie consommée par le plus grand centre de données du monde, Equinix, est de 6,46 TWh/an. L'ensemble des services numériques sur Internet consomme 2 000 TWh/an. En France, les services numériques consomment 10 TWh/an, soit 0,5% de l'énergie numérique totale. Nous utiliserons le mégawatt : MW ou la version de TWh/an pour mesurer la puissance (la puissance étant une *consommation d'énergie* ici par an voir [0]). Nous utiliserons également le kWh pour mesurer l'énergie.<sup>11</sup>

Si  $\Delta \mathcal{W}$  est la quantité de travail effectuée pendant une période de temps d'une durée  $\Delta t$ , la puissance

moyenne  $P_{moy}$  sur cette période est donnée par la formule :  $P_{moy} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$ .

Ce qui suit est l'évaluation de l'énergie totale consommée — c'est-à-dire la puissance — des systèmes monétaires et de paiement dans le monde en comparaison à la consommation énergétique du Bitcoin.

## MÉTHODOLOGIE

En économie, la *monnaie* est une mesure du *travail*<sup>12</sup>, une valeur communément appelée *prix*<sup>13</sup>. Aujourd'hui, la monnaie est considérée comme un *instrument financier* émis par des autorités monétaires spéciales telles que les banques centrales. Dans ce papier, nous soutenons que la monnaie peut être qualifiée de *contrat social*, par essence, et peut donc être définie comme un *actif avec un différentiel de pouvoir intrinsèque* entre deux agents économiques. Traditionnellement, la monnaie remplit trois fonctions : *une unité de compte* comme fondement de la métrologie économique, *un instrument d'échange* permettant de transformer une valeur en travail à travers l'espace sous la forme de transactions de paiement et *une réserve de valeur* transportant cette valeur à travers le temps. On peut facilement constater qu'il existe des relations naturelles entre *la monnaie, le travail*<sup>14</sup>, *l'énergie et la puissance*.

La bonne approche pour comparer le système monétaire et de paiement classique à Bitcoin est de comparer toutes leurs fonctions communes en termes de consommation d'énergie<sup>15</sup>. Bitcoin sert comme :

~ **Système monétaire** : émettre, brûler et faire circuler une cryptomonnaie le *bitcoin* comparable à une banque centrale et ses banques commerciales émettant et distribuant de la monnaie de banque centrale et de la monnaie commerciale.

<sup>8</sup> La *chaleur* et le *travail* mécanique sont des formes spéciales d'une même valeur qui est conservée et est appelée énergie par Lord Kelvin et il a appelé *thermodynamique* la science qui l'étudie.

<sup>9</sup> Un Joule est l'énergie transférée à un objet par le travail de déplacement d'une distance d'un mètre contre une force d'un newton.

<sup>10</sup> La règle de conversion est 1kWh = 3 600 000 Joules ou 1Wh = 3600J

<sup>11</sup> Pour aider à comprendre la signification de l'efficacité énergétique et de la puissance par rapport à l'énergie, notez que brûler 1 kg de charbon libère beaucoup plus d'énergie que faire exploser 1 kg de TNT, mais comme la réaction du TNT libère de l'énergie beaucoup plus rapidement, elle fournit beaucoup plus de puissance que le charbon.

<sup>12</sup> Platon la définissait comme une convention sociale tandis qu'Aristote comme une mesure du travail Voir le texte d'Aristote ici

<sup>13</sup> Parfois, le prix de l'argent signifie le taux d'intérêt

<sup>14</sup> Ainsi qu'avec la preuve de travail (*Proof of Work* PoW)

<sup>15</sup> Il n'entre pas dans le périmètre de cette étude de démontrer que Bitcoin peut servir de monnaie et de système de paiement. Ceci est pris comme une hypothèse et promesse de sa Blockchain comme indiqué par le livre blanc de Satoshi.

~ **Moyen de paiement** permettant le transfert de la cryptomonnaie *bitcoin* d'un payeur à un payé. Les nœuds de la blockchain servent de prestataires de services de paiement (PSP), de même que les banques utilisent des systèmes de cartes, des mécanismes de compensation et de règlement dans le secteur classique des paiements électroniques avec les banques centrales.

La *structure de répartition du travail* de haut niveau accompli par le système monétaire peut être simplifiée aux fonctions suivantes :

~ **Émission de la masse monétaire** et circulation de la monnaie électronique ainsi que la monnaie fiduciaire des pièces et billets,

~ **Distribution monétaire** et gestion du cycle de vie à travers l'économie sur la base de prestataires de services bancaires et d'institutions financières supervisées et réglementées. Cela couvre la forme physique de la distribution de la monnaie dans des véhicules sécurisés, des chambres fortes et des distributeurs automatiques de billets, ainsi que la forme électronique de la monnaie.

~ **Tenue de compte**: en utilisant la monnaie de la banque centrale pour des paiements de gros, et la tenue de compte du service bancaire de détail par des solutions de core banking et de la banque en ligne.

~ **Flux de paiement non-carte** tels que les virements électroniques, les prélèvements et autres opérations transfrontalières ou messages financiers utilisant Swift comme fournisseur tiers en plus des mécanismes de compensation et de règlement (CSM).

~ **La monétique** pour les services de paiement par carte qui comprennent les solutions et les terminaux (TPE) d'acceptation aux points de vente (PdV), en plus de l'émission et de la distribution de cartes plastiques ou virtuelles, de l'autorisation des paiements de proximité et en ligne par le biais d'un schéma de cartes tel que Visa, MasterCard ou Carte Bancaire localement en France. Il comprend également la collecte, la compensation et le règlement de ces transactions par le biais de chambres de compensation.

Il est important de noter que la présente étude est une évaluation globale des paiements dans le monde, alors qu'en réalité les systèmes de paiements électroniques sont très fragmentés et présentent des caractéristiques et des niveaux d'efficacité différents selon les régions et les pays du monde. En outre, l'empreinte carbone en CO2 par exemple n'est pas une approche fiable, car de nombreuses entreprises et industries couvrent leur empreinte carbone en achetant des crédits carbone. L'empreinte carbone qui en résulte ne correspond pas à leur véritable émission de carbone. La seule approche scientifiquement fiable consiste à calculer *l'énergie* en térawattheures (TWh) par an nécessaire à chaque système pour fonctionner, et à comparer le *travail* accompli sous cette forme pure d'énergie en entrée sans tenir compte des sources d'énergie.

### PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

Le champ d'application choisi consiste à comparer le "Run" ou la production de Bitcoin et celle du système électronique : cela signifie qu'il faut comparer la consommation d'énergie des opérations de fonctionnement similaires et laisser de côté le "Build" correspondant à la mise en place de chaque système, comme la fabrication des guichets automatiques bancaires (GAB) ou des unités de minage PoW, l'impression de la masse des billets de banque et la frappe des pièces. Quoique la comparaison des "Build" aurait été favorable pour le Bitcoin, elle lui confère un avantage injuste. L'émission de bitcoins, appelée le minage, est incluse car elle fait partie des opérations courantes. L'impression annuelle des billets de banque et la frappe des pièces sont également incluses, la distribution de billets et pièces aux distributeurs automatiques et l'acceptation aux points de vente électroniques sont également incluses pour assurer la gestion électronique des liquidités. En outre, tous les fournisseurs de services de paiement tels que PayPal ou tout autre fournisseur de solutions de paiement ou d'acceptation sur une place de marché sont exclus du champ d'application car ils peuvent également proposer des solutions de cryptopaiement ou être remplacés par des portefeuilles blockchain. Ils sont donc exclus du champ d'application pour des raisons de simplification et pour garantir une méthodologie homogène.

La plupart des études<sup>16</sup> disponibles n'ont pas tenu compte du fait que c'est une erreur de comparer Bitcoin à Visa. Un schéma carte n'exécute pas une transaction de paiement de bout en bout comme le fait Bitcoin, mais ne fait qu'assurer une autorisation en temps réel entre les acteurs de la chaîne de valeur des paiements : la banque du titulaire de la carte, appelée Émetteur, et la banque du commerçant appelée Acquéreur. Dans la majorité<sup>17</sup> des cas, les schémas carte et les deux banques doivent compléter la transaction en différé en utilisant la monnaie de la banque centrale et parfois entre les banques correspondantes et différentes banques centrales dans le cas d'un paiement transfrontalier. En comparaison, une transaction en bitcoin est finalisée quasiment en temps réel, c'est un paiement en une seule étape et le temps de finalisation est fixé à environ 10 minutes en moyenne (ou en temps réel via Bitcoin Lightning).

	<i>Electronic System</i>	<i>Crypto System</i>
<i>Emission annuelle</i>	Included	Included
<i>Distribution</i>	ATM and POS	N/A
<i>Tenue de compte</i>	Banks	Blockchain
<i>Monétique</i>	Acceptance, POS, authorisation & CSM	N/A
<i>Flux</i>	Wiretransfer, debit, etc.	Cryptopayment
<i>Chèques</i>	Excluded	N/A
<i>Services financiers</i>	Excluded (insurance & loans, etc.)	Excluded (DeFi)

*Périmètre des fonctions incluses pour l'évaluation énergétique (texte surligné) [T0]*

Notez que les services de crédit sont exclus du champ de cette étude, ainsi que les services financiers DeFi et les cas d'usage du web 3.0, afin de se concentrer sur le Bitcoin par rapport aux industries monétaires et de paiement. Les paiements par chèques électroniques sont également exclus du champ de l'étude par souci de simplification, compte tenu de la diminution de leur adoption (ils consomment néanmoins une énergie considérable, notamment pour l'impression, la distribution et le retour à la banque).

<sup>16</sup> Par exemple, le rapport de la DNB "The carbon footprint of bitcoin" ou Arcane Research "The State of Lightning" — Oct 2021

<sup>17</sup> Il existe un mode de paiement par carte dit "single mode" qui permet de débiter instantanément le porteur de la carte et de créditer directement le compte marchand, mais la plupart des transactions de paiement par carte sont en "dual mode" nécessitant des étapes distinctes : autorisation suivie de l'encaissement traductions en fin de journée, puis demande à un mécanisme de compensation et de règlement-livraison d'une compensation en monnaie banque centrale. Cette distinction n'impactera pas la consommation énergétique des acteurs en général mais augmentera seulement la rapidité de certains paiements électroniques par rapport aux cryptopaiements.

Une approche qui compare les valeurs des transactions en équivalent USD, et non uniquement les volumes de transactions, est également inadaptée. Dans les deux systèmes, la consommation d'énergie ne sera pas affectée par la valeur des transactions. Nous nous sommes arrangés pour exclure à 100% de notre recherche les taux de change ainsi que les montants échangés entre Bitcoin et les paiements classiques en dollar ou en euro par exemple.

Enfin, les sources d'énergie utilisée et le mix énergétique ne sont pas pris en compte afin de se concentrer sur les questions les plus fondamentales : l'apport énergétique et l'efficacité énergétique.

Notre recherche suit le chemin complet d'une transaction monétaire et de paiement classique, depuis son émission (production annuelle) en passant par un distributeur automatique, un terminal de paiement ou un point de vente, puis à son acceptation en paiement. Nous passons ensuite à l'énergie consommée par les schémas de paiements par carte de systèmes tels que VISA et Mastercard, et par l'acceptation par les sites de vente en ligne, puis nous poursuivons le voyage à travers le système bancaire jusqu'au mécanisme de compensation et de règlement de la banque centrale. Enfin, nous examinerons l'importante mise à jour des paiements classiques en paiements instantanés. Pour une transaction Bitcoin, nous considérerons simplement le matériel total utilisé pour le minage et le traitement et nous calculerons l'énergie exacte consommée par la Blockchain PoW. Plus tard, nous évaluerons également l'importante amélioration apportée par Bitcoin Lightning.

Enfin, nous calculerons et comparerons l'énergie consommée par une seule transaction dans les deux systèmes : le système classique comparé au système PoW puis le Paiement instantané comparé au Lightning. Nous proposerons ensuite une équation d'efficacité énergétique qui nous permettra d'arbitrer à la fois sur la capacité, la vitesse et la consommation d'énergie par transaction des deux systèmes.

1	INTRODUCTION	10	ÉNERGIE AGENCES BANCAIRES
2	APPROCHE SCIENTIFIQUE	11	ÉNERGIE DES TRAJETS
3	METHODOLOGIE	12	ÉNERGIE SI BANCAIRE
4	PÉRIMÈTRE	13	ÉNERGIE SYST. INTERBANCAIRE
5	ÉNERGIE BILLETS & PIÈCES	14	RESULTATS PAIEMENT CLASSIQUE
6	ÉNERGIE DES GAB	15	ÉNERGIE DE BITCOIN
7	ÉNERGIE DU TRANSPORT DE FOND	16	COMPARAISON À TX UNITAIRE
8	ÉNERGIE EN PdV ET EPOS	17	LIGHTNING VS INSTANT
9	ÉNERGIE PAIEMENTS PAR CARTE	18	CONCLUSION

Sommaire [T1]

## ÉNERGIE DES BILLETS & DES PIÈCES

Commençons par calculer la consommation énergétique des taux de renouvellement des billets et des pièces. Notez que nous ne tiendrons pas compte de l'impression et de la frappe initiale de la monnaie fiduciaire, conformément à notre méthodologie consistant à comparer uniquement la consommation d'énergie des deux systèmes pendant leur durée de fonctionnement.

Bien que vous puissiez considérer que les billets et les pièces ne sont pas une forme de monnaie électronique et qu'ils ne devraient pas être pris en compte, cette forme de monnaie de banque centrale est utilisée dans les paiements électroniques de détail tels que les guichets automatiques ou les terminaux de point de vente électroniques. Elles sont donc comptabilisées dans les transactions de paiement électronique.

Afin d'estimer la quantité annuelle d'énergie nécessaire à l'impression et à la frappe, nous devons estimer le nombre total de pièces et de billets de banque utilisés dans le monde et le taux de renouvellement actuel. Ces chiffres sont difficiles à estimer étant donné le manque d'informations de certains pays, les différences de valeur des monnaies et les préférences des consommateurs pour les pièces ou les billets qui diffèrent largement d'un pays à l'autre. Pour réussir ce défi critique et réduire la marge d'erreur, nous avons utilisé deux sources et méthodologies différentes pour affiner l'évaluation.

Selon la BCE, il y a aujourd'hui 28,67 milliards de billets et 141,97 milliards de pièces en circulation

dans la zone euro, représentant respectivement 1,587 milliard d'euros et 31,426 milliards d'euros. Après la période du COVID, la demande d'espèces a augmenté pour atteindre un total de 16% du PIB de la zone euro en 2022, avec 342,56 millions de personnes utilisant l'euro. Selon la Banque centrale de l'Inde, il y avait environ 124,36 milliards de billets de banque et 122,99 milliards de pièces en circulation en 2021 en Inde. La Federal Reserve Bank a publié qu'il y avait 67,68 milliards de billets de banque en 2022 libellés en dollars et d'une valeur de 2 750,27 milliards de dollars. En ce qui concerne les pièces de monnaie aux États-Unis, il y avait environ 28 milliards de pièces en circulation en 2016, mais 15 à 20 milliards de pièces sont frappées chaque année, selon le département américain du Trésor.

Sur la base des chiffres ci-dessus et par extrapolation en fonction de la population, nous arrivons à un total de 842,6 milliards de billets en circulation dans le monde. Pour confirmer notre estimation, nous avons vérifié auprès d'une seconde source qui a estimé à 576 milliards de billets dans le monde en 2018. Plusieurs banques centrales ont confirmé un taux de croissance de 12% à 16% par an de l'impression de billets de banque depuis 2018, cela conduit à compter des billets entre 1015 milliards et 1210 milliards de billets de banque selon cette deuxième source. Cela confirme notre fourchette de 842,6 milliards de billets comme une estimation sûre de la borne inférieure avec un taux de croissance moyen de 11,57% par an au cours des 4 dernières années.

Pour les pièces en circulation, la même extrapolation nous conduit à environ 1507,7 milliards de pièces dans le monde en 2022. Nous concluons que globalement le ratio pièces/billets est  $\approx 1,79\times$  bien que ce ratio diffère largement autour du globe entre  $\sim 1\times$  en Inde à  $\sim 4,9\times$  en UE.

Ce qui est important pour nous, c'est le taux de renouvellement de cette masse monétaire. On estime que le taux de renouvellement des billets de banque est de  $\sim 26,04\%$  par an, ce qui signifie que 219,42 milliards de billets sont imprimés chaque année pour remplacer les billets usés retirés de la circulation et pour répondre à la nouvelle demande.

Les pièces de monnaie ont un taux de renouvellement plus lent. Une pièce en circulation a une durée de vie estimée à 30 ans ou plus et aujourd'hui l'US Mint a émis 15 milliards de pièces en 2021, ce qui donne un taux de renouvellement

d'environ 11,54% pour le dollar et de 2,52% par an pour les pièces, selon les données de la Banque centrale européenne. Différents pays pourraient avoir un ratio d'augmentation plus important mais nous basons nos calculs sur un taux de renouvellement de ~7% et cela conduit à un taux de frappe mondial de 106 milliards de pièces par an. Les résultats sont donc les suivants :

Nb(billets)  $\approx$  842,57 milliards [1a]

Nouv(billets)  $\approx$  219,42 milliards billets/an [1b]

Nb(pièces)  $\approx$  1507,7 milliards pièces [1c]

Nouv(pièces)  $\approx$  106 milliards pièces/an [1d]

Estimons maintenant la consommation énergétique de [1b] et [1d].

La consommation énergétique de l'impression de monnaie papier sécurisée est difficile à estimer précisément. La fabrication, l'impression, la découpe, le regroupement, le comptage, le contrôle et la reliure du papier sont des processus industriels complexes et lourds (nous tiendrons compte du transport de fonds ci-après). Une approche simplifiée qui peut nous donner une borne inférieure, consiste à estimer la consommation d'énergie de la fabrication industrielle des magazines. Nous avons calculé que l'impression de 35 000 exemplaires d'une magazine de 96 pages consomme environ 37,2 KWh par page.

Cela nous permet d'affirmer que l'impression [1b] peut consommer au moins 8 163 TWh/an. Environ 83% de cette énergie est consommée pour fabriquer le papier qui passe dans la presse. Seulement 11,1% sont nécessaires pour imprimer, couper, assembler. Comme nous ne prenons pas en compte la fabrication du papier mais uniquement les opérations courantes de transformation du papier en billet de banque cela réduit d'autant la valeur énergétique.

**Energie(Billets)  $\approx$  906 TWh/an** [1e]

Selon "The United States Mint's 2011 Sustainability Report", la consommation totale d'énergie de l'US Mint en 2011 était de 192 906 111 KWh. Cela comprend la consommation de gaz naturel, de diesel, de pétrole liquéfié, d'électricité et de vapeur. En 2011, 8,7 milliards de pièces ont été frappées par l'US Mint. Cela nous donne un coût énergétique par

pièce de  $\approx$ 23,53 Wh/coin, et une consommation énergétique totale pour la frappe annuelle dans le monde entier aujourd'hui d'environ 2,49 TWh/an. Ce chiffre exclut la consommation d'énergie liée à l'extraction des métaux et au transport et ne couvre que le processus de frappe et la transformation en pièces de banque centrale.

**Energy(Pièces)  $\approx$  2,5 TWh/an** [1f]

En conclusion, la consommation totale d'énergie pour l'impression et la frappe de monnaie est

**Énergie(Billets&Bièces)  $\approx$  908,6 TWh/an** [1]

Notons que sur des bases annuelles, la frappe de monnaie consomme moins d'énergie que l'impression des billets en raison d'une demande très importante sur les billets par rapport aux pièces et parce que les pièces ne nécessitent aucun entretien et ne sont pas recyclées, leur cycle de vie s'arrête pratiquement à la production, alors que les billets se détériorent rapidement et sont fréquemment renouvelés. Nous avons exclu de l'évaluation la consommation d'énergie liée à l'extraction des pièces en métal et à la fabrication des billets en papier, conformément à notre méthodologie. Enfin, nous avons également exclu l'impression et la frappe initiales de l'ensemble des espèces en circulation et n'avons évalué que les nouvelles espèces mises en circulation chaque année.

## ÉNERGIE DES GUICHETS AUTOMATIQUES

Nous avons calculé et vérifié dans notre étude que le nombre total de distributeurs automatiques de billets dans le monde est estimé à **4.823.564**. Ce chiffre peut être atteint en se basant sur des études pays par pays du nombre de distributeurs automatiques de billets pour 100 000 personnes. Nous l'avons vérifié en reprenant les sources des banques centrales de 35 pays représentatifs couvrant plus de 5 milliards de personnes sur tous les continents et basées sur les rapports officiels des banques centrales. Nos calculs ont abouti à une moyenne de 60,7 distributeurs automatiques de billets pour 100 000 personnes sur l'ensemble de la population mondiale, soit 7,939 milliards de personnes. Cette estimation tient compte de la baisse de l'utilisation des Guichets automatiques bancaires (GAB) dans plusieurs pays du monde.

Pour une petite banque, un distributeur automatique de billets a une puissance<sup>18</sup> quotidienne moyenne d'environ 250W maximum selon une première source. Nous considérons une moyenne de 230W par GAB pour nos calculs et évaluons la consommation d'énergie des GAB mondiaux à environ 9.72 TWh/an. Une deuxième source est Diebold, le fournisseur de GAB, qui estime qu'un terminal a une consommation moyenne de 1620 kWh/an, soit 7,81 TWh/an. Nous considérerons une moyenne de 8,77 TWh/an.

Mais dans la pratique, les GAB ne sont pas utilisés seuls, ils nécessitent deux climatiseurs et un éclairage (qui peut être dans une agence ou en dehors d'une agence bancaire). Un climatiseur de taille moyenne consomme environ 900W. Comme le fonctionnement d'un climatiseur 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 réduit sa durée de vie, deux climatiseurs sont utilisés en alternance<sup>19</sup> pour assurer une couverture à plein temps. En prenant la consommation moyenne de tous les GAB et en n'incluant qu'un seul climatiseur, cela conduit à une fourchette plus réaliste de **46,8 TWh/an** pour tous les GAB dans le monde.

**Energie(GAB) ≈ 47 TWh/an** [2a]

Cette estimation ne prend pas en compte : la consommation côté serveur, le traitement des espèces, ou toute intervention de maintenance sur les GAB. Elle peut donc être considérée comme un besoin énergétique minimal pour faire fonctionner les GAB mondiaux aujourd'hui.

## ÉNERGIE DU TRANSPORT DE FOND

Évaluons maintenant la consommation d'énergie liée à la gestion physique des espèces et concentrons-nous sur le transport de fonds, c'est-à-dire le transfert physique de billets de banque, de pièces, de cartes de crédit d'un endroit à un autre. Ces lieux comprennent les centres de traitement des espèces et les succursales bancaires, les guichets automatiques, les grands détaillants et d'autres locaux contenant de grandes quantités d'argent liquide, tels que les distributeurs de billets et les parcmètres. Des

entreprises telles que Loomis et Brinks sont les principaux fournisseurs de ce secteur et sont représentatives de la charge de travail nécessaire.

Loomis dispose de plus de 200 centres de traitement des espèces équipés d'une technologie permettant de compter, d'authentifier et de vérifier la qualité des billets et des pièces. Nous ignorerons la consommation des machines de vérification et d'authentification comme une simplification supplémentaire de notre modèle et nous nous concentrerons uniquement sur la consommation d'énergie du transport. Loomis traite jusqu'à 50 millions de billets par jour dans les centres de traitement et dispose de 6000 véhicules de transport sécurisé. Brinks dispose de 1100 installations d'exploitation et d'une flotte de 13 300 véhicules. Ces véhicules consomment des quantités importantes d'énergie. Un véhicule blindé diesel peut consommer ~3,3 kWh par kilomètre. Notez que l'énergie cinétique ne représente que 30% de l'énergie d'entrée requise pour le camion, le reste se perd principalement dans les gaz d'échappement. Les estimations ont calculé une moyenne de ~35 litres de diesel tous les 100 km. Un litre de carburant diesel a une énergie de ~10 kWh. Cela confirme l'estimation d'environ 3,5 kWh/km.

Le transport de fonds est un processus complexe avec de multiples étapes. Les véhicules de transport de fonds peuvent transporter des billets de banque et des pièces de monnaie des centres de paiement aux banques, ou des détaillants aux banques, par exemple. La quasi-totalité de la flotte est utilisée quotidiennement, les sociétés de transport de fonds optimisent le nombre de véhicules pour ces rotations sans compter le coût énergétique de leur entretien comme une simplification supplémentaire. Dans la plupart des cas, une couche supplémentaire est ajoutée au processus de transport de fonds car un véhicule banalisé appartenant à la banque circule en accompagnement du véhicule blindé, doublant ainsi presque le nombre de véhicules impliqués, mais pas le trajet de transit.

Il est très difficile d'estimer le nombre de camions blindés pour le transport de fonds dans le monde. Une bonne estimation consiste à prendre en compte le nombre total de billets de banque en circulation

<sup>18</sup> Ces estimations ignorent pour l'instant la consommation d'énergie côté serveur des GDG Gestionnaires de Guichets automatiques bancaires de Diebold Nixdorf ou NCR par exemple

<sup>19</sup> Notez que ces unités AC ne sont pas utilisées dans l'agence bancaire elle-même mais uniquement dédiées au guichet automatique

dans le monde, voir [1a]. Nous avons estimé que la vitesse des billets de banque est  $\approx 1,5 \times$ , ce qui signifie qu'un billet de banque circule et revient à son point de départ (ex. un GAB) 1,5 fois par an.

La flotte de Loomis aux États-Unis compte 3000 véhicules (50% de leur flotte mondiale) et traite 25 millions de billets par jour aux États-Unis. Cela conduit à une capacité moyenne par véhicule de transport de fonds de  $\sim 3\,041\,667$  billets par an. En tenant compte de la vitesse des billets et du nombre total de billets dans le monde, nous estimons qu'il y a environ 6,03 millions de véhicules de transport de fonds dans le monde, y compris une estimation modérée d'une voiture de banque pour 2 camions blindés, soit 5,4 millions de camions. Lorsque nous prenons l'hypothèse modérée qu'un véhicule blindé transporte le cash sur  $\sim 40$  km par jour pendant 220 jours par an, et que la voiture bancaire banalisée n'accompagne le camion que sur la moitié du trajet nos estimations conduisent à une puissance totale de transport de fonds de (*Cash in Transit CIT*) :

**CIT(Véhicules)  $\approx$  6 million véhicules** [2b]

**Energie(CIT)  $\approx$  166 TWh/an** [2c]

Ce chiffre ne tient pas compte des centres de traitement et des employés qui gèrent les espèces et la distribution depuis les banques centrales. Cela exclut également la consommation d'énergie pour les activités de maintenance de ces véhicules, de sorte que [E] doit être considéré comme un besoin énergétique minimal pour l'activité globale de transport de fonds.

## ÉNERGIE DES PAIEMENTS EN PdV

Les paiements physiques en espèces sont par nature privés et, en l'absence de traçabilité électronique, sont plus difficiles à compter. Dans nos recherches, nous avons constaté que la part des transactions en espèces à un point de vente électronique est plus fréquente que la distribution d'espèces par les banques et même plus fréquente que les paiements de proximité électroniques dans les magasins. En Europe, les transactions en espèces représentent en moyenne environ 68,1% de toutes les transactions de paiement de proximité aux points de vente<sup>20</sup>.

Globalement, les billets et les pièces représentent plus de 50% des transactions dans la plupart des pays de l'OCDE. Pour vérifier cette première estimation, nous nous référons au rapport de la Banque centrale européenne qui estime que la part des instruments de paiement utilisés tant aux points de vente qu'en pair-à-pair, en termes de volume (nombre) des transactions est d'environ 73% de toutes les transactions de paiement y compris en points de vente (et 48% de la valeur des transactions). Nous calculons que le nombre moyen de transactions en espèces aux points de vente et en pair-à-pair par personne, par jour et par pays est d'environ 1,14 Tx/jour/personne en Europe, avec de grandes disparités entre les appétits d'argent liquide selon les pays : les Grecs, les Italiens et les Portugais réalisent 1,6 Tx/jour/personne (contre 0,5 pour les Néerlandais et les Estoniens). En se basant sur le chiffre de 1,6 comme moyenne mondiale et en l'extrapolant à la population mondiale, on arrive à 3 300 milliards de transactions en espèces sur les points de vente électroniques par an. Mais comme l'Europe a moins de transactions en espèces que le reste du monde, le chiffre réel peut être considérablement plus élevé.

**PoS(TxCash)  $\approx$  3 300 milliards Tx/yr** [3a]

L'énergie totale pour une transaction en espèces de pair à pair est plus difficile à estimer car ces transactions sont privées par nature, et toutes ne sont pas enregistrées électroniquement. Mais il est important de comptabiliser au moins la quantité qui est traitée électroniquement dans les points de vente, car la gestion des espèces a un coût élevé pour les commerçants aussi, et pas seulement pour les banques. Aujourd'hui, Visa dessert à elle seule 100 millions de commerçants dans le monde, un chiffre en augmentation, en grande partie grâce aux initiatives gouvernementales visant à promouvoir les paiements sans numéraire. On peut estimer le nombre de commerçants qui n'acceptent que les paiements en espèces à la majorité des très petits magasins du monde entier qui n'acceptent toujours pas les paiements par carte. En se basant sur les estimations de la BCE selon lesquelles 27% des paiements de proximité sont des transactions par carte et 73% sont des paiements en espèces dans un PdV, nous pouvons estimer que 370 millions de commerçants dans le monde acceptent les espèces en utilisant un encaissement électronique au PdV. Si l'on

<sup>20</sup> Allant de 88% à Malte à 77% en Allemagne jusqu'à 34% aux Pays-Bas (59% en France)

considère qu'une caisse électronique travaille en moyenne 8 heures par jour et consomme aussi peu d'énergie qu'un terminal de paiement (TPE), soit environ 111,6 W (*voir les références ci-après*), cela donne au moins 72,75 TWh/an pour des caisses électroniques des PdV travaillant 220 jours par an, 8 heures par jour, et ne comptant qu'un seul système de paiement en ligne par site commerçant<sup>21</sup>.

**Energie(Espèces) ≈ 72,8 TWh/yr** [3b]

**Energie(TxEspèce) ≈ 22,03 Wh/Tx** [3c]

## ÉNERGIE DES PAIEMENTS PAR CARTE

Après avoir estimé la gestion de l'argent électronique des points de vente qui n'acceptent pas les cartes, nous allons estimer dans ce paragraphe la consommation d'énergie des transactions de paiement par carte. Le leader du paiement par carte, Visa, possède 4 centres de données situés au centre des États-Unis, à l'est des États-Unis, au Royaume-Uni et à Singapour, avec un réseau de communication privé de 10 millions de miles (400 fois la circonférence terrestre<sup>22</sup>). Bien que Visa garde confidentielle l'énergie exacte requise par ses centres de données, il est possible de calculer que les centres de données de Visa nécessitent en moyenne 305 MW par centre de données pour fonctionner [4c].

Ces calculs sont basés sur le rapport annuel de Visa (*Visa Green Bond Report - juillet 2021*) indiquant que la consommation énergétique des centres de données de Visa est restée stable entre 2017 et 2020, totalisant 446 millions de kWh. Cette estimation conduit à une consommation d'énergie par Visa de ≈ 2,7 TWh/an [4a]. La part de marché de Visa peut être estimée à environ 15% du total des cartes dans le monde. Ceci peut être obtenu par la déclaration de Visa qui traite 3,8 milliards de cartes et nous savons que le nombre total de cartes de paiement était de 25,2 milliards de cartes en 2021. Maintenant, nous pouvons extrapoler [4a] et voir que la consommation totale des datacenters de paiements de schéma de cartes est de

≈ **17,72 TWh/an** pour faire fonctionner tous les paiements par carte dans le monde.

**Energie(Schemes) ≈ 17,72 TWh/an** [4]

Ainsi, sur la base des chiffres de Visa, nous pouvons extrapoler que le total des cartes de paiement génère 1 540 milliard de transactions par an (Tx/yr) [4d] soit environ 48 891 Tx/s déplaçant 86,2 milliards USD/an. Cela donne une moyenne de 56 USD/transac (en paiements par carte) [4e].

Pour rappel, ces transactions ne sont pas finalisées, il s'agit la plupart du temps de demandes d'autorisation en ligne adressées à l'Émetteur pour le compte de l'Acquéreur<sup>23</sup> ; le paiement sera complété ultérieurement par les opérations de collecte, de compensation et de règlement en monnaie centrale. Nous estimerons l'énergie de ces étapes plus tard dans notre étude. Par conséquent, les transactions de paiement par carte (qui ne représentent qu'une étape intermédiaire de la transaction de paiement de bout en bout) nécessitent globalement environ 11,49 Wh/Tx en énergie pour être traitées par un schéma de carte comme Visa ou Mastercard.

**Energie(TxScheme) ≈ 11,49 Wh/Tx** [4a]

Pour compléter l'estimation, un paiement par carte a généralement pour origine un terminal de paiement électronique (TPE) dans le cas des paiements de proximité<sup>24</sup>. Nous avons estimé que la base installée mondiale est d'environ 207 millions de TPE en 2020. Nous avons ensuite calculé que la consommation énergétique minimale des TPE par transaction ≈ 0,9401 Wh/Tx. Selon une méthode différente et plus précise, la consommation<sup>25</sup> énergétique moyenne des TPE est de ≈ 111,66 W. Si un terminal travaille 8 heures par jour en moyenne et si il est en ligne pendant 80 % des heures de travail, nous calculons que la consommation énergétique totale des TPE est plus précisément de 54 TWh/an pour les 207 millions de terminaux.

<sup>21</sup> Nous ne comptabiliserons pas le transport d'espèces par les commerçants entre les succursales et par les clients car cela pourrait avoir un impact important sur les résultats sans être complètement comparable aux paiements Bitcoin

<sup>22</sup> Soit 5 096 800 Km de câbles uniquement entre les serveurs du datacenter

<sup>23</sup> Dans les paiements par carte, l'Émetteur est la banque émettrice de la carte et l'Acquéreur est la banque du commerçant qui acquiert le paiement en son nom

<sup>24</sup> Étant donné que les paiements en ligne se déclenche de la même source que les cryptopaiements en Bitcoin, le matériel source est exclu du champ des calculs

<sup>25</sup> Source: *Energy Losses Due to Imperfect Payment Infrastructure and Payment Instruments* par Oleksandr Melnychenko, Oct 9, 2021

**Énergie(TPE)  $\approx$  54 TWh/an** [4b]

Sur la base de [4] et [4b], nous concluons que les transactions de paiement par carte consomment 71,71 TWh/an.

**Énergie(SchemesCarte)  $\approx$  71,71 TWh/an** [5]

**Énergie(TxCarte)  $\approx$  46.51 Wh/Tx** [5a]

Notez que la différence entre l'encaissement électronique en PdV par opposition aux paiements carte sur TPE est que l'une est seulement due à la consommation d'énergie des systèmes de caisses [3b] contre celle des terminaux de paiement par carte [4b]. Ce sont deux matériels différents, servant des moyens de paiement différents au point de vente.

### ÉNERGIE DES BUREAUX DES BANQUES

Nous devons compléter l'estimation avec le flux de paiement de bout en bout à travers les banques et d'autres acteurs inter-institutions financières tels que les chambres de compensation et les prestataires de services de paiement (PSP) de type Swift. Cela n'inclut pas tous les services fournis par les banques, tels que les assurances, les prêts ou le trade, mais se focalise sur les services de gestion des comptes et des paiements. Le secteur bancaire compte plus de 25.000 banques dans le monde [6a]. Les banques gèrent globalement un nombre élevé d'agences qui consomment également une grande quantité d'énergie pour fonctionner. Selon le Fonds monétaire international (FMI), le nombre d'agences des banques commerciales est d'environ 14,145 agences pour 100 000 personnes. Sur la base de la population mondiale, nous pouvons estimer qu'il y a 1 122 972 agences bancaires [6b].

**Nb(Banque)  $\approx$  25.000** [6a]

**Nb(AgenceBancaire)  $\approx$  1,123 million** [6b]

La consommation énergétique des agences bancaires peut être évaluée à travers le nombre moyen de kilowattheures par mètre carré pour un bâtiment

commercial. Selon le *Department of Energy* (DOE), cette énergie électrique est d'environ 242,2 kWh/m<sup>2</sup>.

Traditionnellement, la taille des agences bancaires varie<sup>26</sup> entre 371,6m<sup>2</sup> et 557,4m<sup>2</sup>. Nous avons vérifié auprès d'une autre source, une banque chef de file française, qu'une banque de taille moyenne peut consommer environ 21% de son énergie sur les besoins de ses bâtiments d'agences<sup>27</sup> et selon les feuilles de route des banques pour améliorer l'efficacité énergétique de leurs bureaux et agences, elles visent une moyenne de 137,14 kWh/m<sup>2</sup> en 2024. Cela confirme la fourchette et bien que les banques du monde entier améliorent leur impact carbone, de grandes disparités subsistent entre elles. Nous considérerons la moyenne de 242,2 kWh/m<sup>2</sup> en 2022 dans le monde. Cela conduit à une consommation d'énergie par l'ensemble des bureaux et agences bancaires dans le monde de 151 TWh/an, en excluant pour l'instant les services informatiques et les centres de données des banques.

**Énergie(Agence)  $\approx$  242,2 KWh/m<sup>2</sup>** [6c]

**Énergie(Agences)  $\approx$  151,6 TWh/yr** [6]

### ÉNERGIE DES TRAJETS DOMICILE-TRAVAIL

Le nombre d'employés travaillant dans le secteur bancaire peut être estimé par extrapolation à partir de pays représentatifs où de telles statistiques sont rendues disponibles officiellement par les banques centrales. Sur la base des rapports des grandes banques américaines, des banques centrales de la Chine, de l'Inde, de la zone euro et du Japon, nous pouvons estimer que 1850 employés travaillent par banque en moyenne dans le monde. Cela donne un total de 46.250.597 employés travaillant dans le secteur bancaire dans le monde [7a].

Si l'on considère une liste d'une centaine des principaux prestataires de services de paiement dans le monde, le nombre moyen d'employés par PSP est d'environ 12000. Nous avons estimé le nombre total d'employés travaillant dans l'industrie des paiements à plus de 1,2 million d'employés dans le monde entier, allant des fabricants de guichets automatiques,

<sup>26</sup> Nous avons basé le calcul sur 6000 pieds carrés au lieu de 4000 pour tenir compte du siège social et des dépendances supplémentaires autres que les succursales bancaires pour le public.

<sup>27</sup> Source : Communication officielle interne d'une des 12 grandes banques françaises selon leur programme d'amélioration de l'efficacité énergétique.

du fabricant des solutions de paiements en ligne aux commutateurs et processeurs de paiement, etc.

**Banques ≈ 46,25 millions employés** [7a]

**Paiements ≈ 1,2 million employés** [7b]

Ces estimations tiennent compte des employés directs et ignorent le nombre assez important de prestataires externes tels que les agents de sécurité et de gardiennage, les employés des sociétés de transport de fonds, les consultants externes, etc.

Il est important de distinguer uniquement le décompte [7a] des employés travaillant au moins partiellement sur les paiements et la gestion des comptes. Nous considérons que les employés travaillant sur la sécurité, la fraude, la maintenance, les risques, le marketing, la comptabilité, la conformité, et d'autres fonctions transversales ou administratives tombent dans le domaine des paiements et de la gestion des comptes puisqu'ils sont essentiels pour ces services. Bien que les employés des agences travaillent également sur les prêts et les ventes d'assurance, ils sont toujours essentiels dans la gestion des comptes, la distribution et la gestion des cartes de crédit, en plus de l'exécution de certains virements et de la tenue de compte.

Il est légitime de réduire [7a] en soustrayant les fonctions bancaires uniquement liées aux prêts, aux assurances et au trading. Le monde compte environ 9,6 millions de traders, mais tous ne travaillent pas dans les banques. Par exemple, dans les principales grandes banques françaises, la Société Générale en emploie 351 employés sur 133.000 employés dans le monde, et BNPParibas 353 sur 193.319 employés au total. En moyenne, nous pouvons voir que 0,22% de l'effectif total est dans le trading, ce qui est négligeable, 103.365 traders travaillant dans les banques. Dans une autre approche, nous pouvons considérer qu'environ 25% des sièges sociaux des banques travaillent sur les prêts, les assurances et le trading, mais que presque 100% des employés des agences sont affectés aux opérations de gestion des comptes et de paiement, au moins à temps partiel. Cela démontre donc que les employés strictement non bancaires et non liés aux paiements peuvent être considérés comme étant à la marge et que le nombre en [7b] peut être réduit d'un facteur de 0,54% pour se concentrer uniquement sur les employés concernés

par les services bancaires et de paiement fondamentaux. Par mesure de sécurité, nous ignorerons [7b] et réduirons légèrement [7a] pour atteindre une limite inférieure des employés de banque.

**Nb(employésBanques) ≈ 46 million** [7c]

La distance moyenne de déplacement en transport par employé serait d'environ 24,14 km en aller simple. Il s'agit d'une distance moyenne entre les grands centres urbains, les banlieues et les sites de campagne éloignés. Selon les chiffres internes des grandes banques françaises, l'énergie utilisée pour les déplacements domicile-travail est due à 57% à la voiture, 26% à l'avion, 17% au train, soit un total de 4400 km/an par employé en moyenne ou 20 km/jour, ce qui confirme notre estimation ci-dessus.

La consommation d'énergie liée au transport d'un employé est de 7 kWh par km par employé. Sur la base de [7c] Cela conduit à 3,420 TWh/an pour tous les trajets quotidiens aller-retour des employés en considérant 220 jours de travail par an en moyenne et en ignorant les voyages en avion comme une simplification des trajets domicile-travail surtout que les politiques des banques limitent aujourd'hui au maximum les voyages en avion.

**Énergie(Commute) ≈ 3420 TWh/an** [7]

## ÉNERGIE DES SI DES BANQUES

Les banques possèdent également des centres de données soit à proximité en interne, soit externalisés ou dans le Cloud. La manière la plus précise de calculer la consommation énergétique du centre de données d'une banque est d'estimer le nombre moyen de serveurs utilisés par banque. Sur la base de nos connaissances et de notre consultation de petites et grandes banques, nous pouvons estimer que chaque banque (petites banques) a un minimum de 300 serveurs variant entre les grands mainframes IBM, les pare-feux, les serveurs de base de données, les routeurs, les serveurs de *core-banking* et les serveurs de banque en ligne, les serveurs de sauvegarde ainsi que les serveurs stockage NAS, etc. Nous estimerons comme borne inférieure<sup>28</sup> :

<sup>28</sup> C'est la moyenne des petites banques, donc en réalité les chiffres sont beaucoup plus élevés

**Nb(ServeursSI) ≈ 300 Serveurs/bank** [8a]

En termes d'utilisation annuelle d'énergie, un serveur à deux sockets peut utiliser entre 1,314 kWh/an (ce qui correspond simplement à sa mise sous tension) et 2600 kWh/an [8e]. La consommation d'énergie en veille des serveurs IBM est liée au nombre de sockets d'unité centrale de traitement (CPU) et est restée stable depuis 2007 à 365W pour les serveurs à deux sockets (Shehabi et al, 2016 ; Shehabi et al, 2018). Mais en réalité, un serveur dans une installation de centre de données nécessite plus d'énergie. Une estimation plus précise pourrait venir du calcul du nombre de serveurs pouvant être utilisés avec une capacité énergétique donnée. Si un centre de données de tier 1 a une capacité de 850 MW et que chaque rack utilisait 25 kW d'énergie, cette institution pourrait faire fonctionner 1.768.000 serveurs. Cela conduit à une énergie minimale requise de 0,481 kW/serveur pour une consommation de 4212 kWh/an [8b].

Pour dénombrer le nombre total de serveurs utilisés dans le secteur bancaire, nous procédons comme suit, dans une approche différente, pour valider nos estimations. Alors qu'Amazon et Alphabet consacrent respectivement 12% et 20% de leurs coûts d'exploitation à l'informatique, les banques consacrent 29% de leurs coûts d'exploitation aux dépenses informatiques. Cela nous indique que les budgets informatiques des banques sont 2,42 fois plus élevés que ceux des GAFAs et des autres industries [8c].

Il y a 100 millions de serveurs qui sont actuellement utilisés dans le monde entier. Un nombre important de ces serveurs sont la propriété de Google et de Microsoft. Au total, nous avons estimé que les centres de données bancaires utilisent 7.500.000 serveurs [8d], soit 7,5% de l'ensemble des serveurs dans le monde, ce qui est un chiffre minimum logique basé sur [8c].

Adoptons maintenant une approche différente. Nous avons vérifié auprès d'une banque française chef de file et qui possède 2 centres de données consommant 1.250 kW chacun. Ce qui conduit à 21,9 GWh/an. En utilisant [6a], on peut extrapoler à 547,5 TWh/an pour tous les centres de données des banques. Mais toutes les banques ne sont pas de grandes

banques. Par exemple, en France, le ratio est de 3,13% de grandes banques, ce qui nous donne environ 783 grandes banques dans le monde sur les 25.000 banques. Cela nous permet d'estimer que les grandes banques consomment environ 17,15 TWh/an sur leurs centres de données. Les petites banques consomment beaucoup moins mais sont beaucoup plus nombreuses. Sur la base de [8d] et [8b], nous calculons que la consommation énergétique minimale des datacenters bancaires est ≈ 31,6 TWh/an avec 85 MW par datacenter en moyenne pour toutes les banques dans le monde. Les grandes banques consomment environ 55% de cette énergie dépensée dans leurs usines bancaires.

**Énergie(UsinesBancaires) ≈ 31,6 TWh/yr** [8]

### ÉNERGIE DES SYSTÈMES INTER-BANCAIRES

Les communications interbancaires utilisant des messageries financières pour la compensation et le règlement des virements électroniques sont également nécessaires pour compléter l'étude. Swift exploite trois centres de données - un à Zoeterwoude, aux Pays-Bas, un autre à Culpeper, en Virginie, aux États-Unis et un troisième en Thurgovie, en Suisse. Elle dispose également d'un centre de commande et de contrôle à Hong Kong. Toutes les banques ne sont pas connectées à Swift, en effet seulement 11.000 d'entre elles le sont. Nous pouvons donc conclure des sources ci-dessus que Swift représente 44% de cette utilisation, sur la base de [6a].

En utilisant [4c], nous estimons à 21,29 TWh/an au minimum la consommation d'énergie des messages de type Swift dans les seuls centres de données.

**Énergie(interbancaire) ≈ 21,3 TWh/an** [9]

Les mécanismes de compensation et de règlement (CSM) sont utilisés par les banques pour réaliser les opérations de paiement comme l'EBA en Europe et le STET en France par exemple. Pour rappel l'envoi d'un simple e-mail sur internet nécessite 25 Wh d'énergie [10a]. A titre d'exemple, STET, le CSM français a traité en 2020 : 16,74 de transactions par an [10b]. Le volume<sup>29</sup> total des cartes selon la Banque de France représente 49% du total des transactions de paiement. Sur la base de [4d], cela

<sup>29</sup> Nombre de transactions et non pas des montants

signifie que le nombre total de paiements mondiaux est de 3 146 milliards de Tx/an, y compris les paiements par carte et les paiements sans carte, tels que les virements et les prélèvements, nécessitant une compensation dans la plupart des cas.

$$\text{Nb(TxPmt)} \approx 3.146.000.000.000 \text{ Tx/an} \quad [10c]$$

Les messages CSM sont compensés en mode fichier batch en général, mais ils deviennent maintenant des transactions de paiement instantanées comme Faster Payments au Royaume-Uni et SEPA SCTInst Scheme dans la zone euro. Nous pouvons soit utiliser une méthodologie d'estimation de la consommation d'énergie pour le cryptage et le transfert de gros volumes de données entre les banques et le CSM, soit utiliser une approche simplifiée en utilisant des transactions au niveau individuel. Sur la base d'une part de [10c] et d'autre part de [4a] et [10a], nous pouvons évaluer les limites inférieure et supérieure de la consommation d'énergie pour les messages CSM entre 36,2 TWh/an et 79 TWh/an. Il est prudent de retenir la moyenne<sup>30</sup>, qui est égale à 57,4 TWh/an. Cette approximation se justifie par le fait qu'un grand fichier de compensation par lots consomme certainement beaucoup plus qu'un seul appel d'autorisation de carte, comme on l'a constaté pour une seule transaction Visa [4a],  $\text{Énergie(CSM)} > 36,2 \text{ TWh/an}$ . Et comme les transactions pour CSM sont regroupées par milliers voire par des dizaines de milliers, chaque transaction consomme beaucoup moins qu'un e-mail de 1 Mo comme dans [10a], de sorte que  $\text{Énergie(CSM)} < 79 \text{ TWh/an}$ . Donc la moyenne est clairement proche de la valeur réelle.

$$\text{Énergie(CSM)} \approx 57,4 \text{ TWh/an} \quad [10]$$

Enfin, les employés de la banque utilisent des ordinateurs personnels, ainsi que des logiciels bancaires reposant sur des serveurs backend généralement logés dans le Cloud. En moyenne, il y a 20 ordinateurs déployés par serveur conduisant à 2.312.530 serveurs en backend pour la banque ainsi que 46 millions d'ordinateurs personnels pour les employés de banque (*Voir* [7c]).

En utilisant [8c] et [11a], cela se traduit par 6,01 TWh/an pour le total des serveurs backend et le Cloud utilisés par les banques pour AWS, Azure et d'autres SAP en mode SaaS. En outre, les ordinateurs de bureau consommant environ 600 kWh/an [11c], ce qui donne 27,60 TWh/an.

$$\text{Nb(BankITServers)} \approx 2,3 \text{ million} \quad [11a]$$

$$\text{Nb(PC-Banque)} \approx 46 \text{ million} \quad [11b]$$

$$\text{Énergie(FrontToBack)} \approx 33,58 \text{ TWh/an} \quad [11]$$

### RÉSULTATS DES PAIEMENTS CLASSIQUES

Enfin, nous avons terminé l'évaluation de la consommation énergétique pour tous les systèmes monétaires et de paiement classiques. En conclusion, nous pouvons estimer que la consommation énergétique totale est la somme des résultats intermédiaires en TWh/an.

$$\text{Energy(SysClassique)} \approx 4981 \text{ TWh/an} \quad [12]$$

Compte tenu des grandes différences d'échelle entre [1][6][7] et les autres centres de coûts énergétiques, il est important de préciser la légitimité de leur inclusion. Pour rappel, les anciens bâtiments des centres téléphoniques et leurs cabines téléphoniques dans le monde entier ont été transformés par l'industrialisation des télécommunications et ont finalement été remplacés par des commutateurs électroniques pour des raisons d'efficacité, d'évolutivité et de meilleurs services. La même démarche peut être appliquée aux domaines de services que Bitcoin vise à couvrir. Notez également que [1][6][7] peuvent être considérés comme traçant une limite inférieure puisque nous n'avons pas pris en compte les banques centrales ni tous les centres de données des émetteurs de monnaie électronique et des fournisseurs de services de paiement enregistrés (tels que Stripe ou PayPal, par exemple).

Nous allons maintenant évaluer l'énergie du Bitcoin PoW.

<sup>30</sup> Pour rappel, une seule transaction de compensation de paiement nécessite plusieurs appels d'API entre la banque sous-participante vers la banque principale vers le CSM puis vers la banque centrale et de nouveau vers la banque et les comptes du payeur et des bénéficiaires, les appels de type batch de fichiers utilisent également le streaming des données des fichiers sur Internet qui consomment beaucoup plus d'énergie qu'une simple et courte autorisation de transaction unique. La quantité de données dans la norme EMV des paiements par carte contient beaucoup moins de données qu'un lot regroupant des dizaines de milliers de transactions par heure ou par jour. C'est donc une estimation modérée de n'utiliser que [10a] et [4a] au lieu de  $n$  fois pour  $n$  appels d'API en termes de coûts énergétiques. Ici, nous avons utilisé une approximation car ces consommations d'énergie sont très différentes d'une banque à l'autre.

## ÉNERGIE DU BITCOIN

Analysons maintenant la consommation énergétique de la blockchain Bitcoin à PoW, en excluant pour l'instant sa surcouche (layer 2 ou L2) Bitcoin Lightning. Le travail d'évaluation le mieux référencé est le Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). Selon [Cambridge](#), la puissance du Bitcoin est censée être égale à 144,82 TWh/an [13], avec une limite inférieure de 53,29 TWh/an et une limite supérieure de 356,83 kWh/an. Cette très grande marge ressemble davantage à une estimation imparfaite de l'ordre de grandeur<sup>31</sup> par Cambridge qu'à une évaluation précise et pourtant ces chiffres sont constamment utilisés pour critiquer le PoW de Bitcoin. Cambridge reconnaît avoir utilisé différentes hypothèses de prix de l'électricité pour les estimations de rentabilité et “uses *simplistic weighting of profitable hardware*”, mais Cambridge est conscient que “*assuming that all profitable equipment is equally distributed among miners is unrealistic given that not all hardware is produced in equal quantities and readily available*”. Il y a donc une grande marge de progrès pour l'amélioration de leur travail et c'est ce que nous allons entreprendre dans ce papier avec une méthodologie complètement différente.

La meilleure méthode, la plus précise scientifiquement, consiste à évaluer la quantité des nœuds de minage Bitcoin et les unités matérielles, puis, sur la base de la puissance de calcul requise (difficulté du PoW) de la base installée par l'ensemble des unités de mineurs, nous pouvons cerner précisément les kWh réellement utilisés par chaque unité de minage disponible sur la Blockchain. Aujourd'hui, 100% des unités de minage sont d'un modèle de matériel spécial appelé ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*). Par conséquent, nous pouvons exclure aujourd'hui le minage de Bitcoin par CPU ou GPU, car ils sont hors réseau ou extrêmement marginaux<sup>32</sup>.

Après l'interdiction de l'exploitation minière en Chine, la carte de l'exploitation minière de Bitcoin [montre](#) que les États-Unis sont récemment devenus le premier pays d'exploitation minière de Bitcoin avec 35,4 % de la puissance du taux de hashage mondial de la blockchain. Il est important d'éviter de

lister tous les matériels ASIC actuellement utilisés selon leur [rentabilité](#) financière. Cette approche nécessite de tenir compte des prix de l'électricité et nous n'avons pas besoin d'utiliser cette voie approximative dans notre recherche. Une meilleure voie est simplement l'efficacité du matériel : c'est-à-dire les Watts consommés par Terahash et les dates de sortie de chaque modèle. Les unités de minage non rentables sont très probablement éteintes aujourd'hui, car par définition le mineur perdrait littéralement de l'argent s'il les allumait, en fonction des coûts d'électricité. Néanmoins, nous avons vérifié auprès de mineurs industriels qu'ils utilisent quand même encore certains anciens modèles d'ASIC considérés aujourd'hui comme non rentables sur la base du prix moyen de l'électricité. Cela est possible parce que certains mineurs industriels ont négocié des coûts énergétiques très bas rendant les anciens modèles rentables.

Appelons  $i$  l'indice d'un modèle d'unité de minage  $m_i$  parmi  $N_t$  modèles au temps  $t$ . Nous appelons l'*Efficiéce énergétique*  $\pi_i$  d'une unité de minage  $m_i$ , la quantité d'énergie requise pour atteindre un taux de 1 tera-hash.

$$\pi_i = \frac{\text{Power}(m_i)}{\text{Hashrate}(m_i)} \text{ (en W par TH)} \quad [14]$$

Commençons par construire le modèle mathématique et la théorie du minage PoW de Bitcoin. Soit à n'importe quel moment du temps  $t$  :

$$M_t = \{m_0, m_1, \dots, m_{N_t}\} \quad |M| = N_t \text{ modèles de minage}$$

Où  $M$  est l'ensemble des modèles d'unités de minage  $m_i$  et où  $N_t$  est le nombre total de modèles disponibles à tout moment  $t$  depuis le début du minage en 2009 jusqu'aujourd'hui en avril 2022.

$$\text{Soit } R_t = \{r_0, r_1, \dots, r_n\} \quad |R| = |M|$$

Telle que  $\forall m \in M, f : M \rightarrow R$  nous donnent la date de mise en marché et nous permet de déterminer l'âge  $\alpha_i$  de l'unité de minage afin de déterminer ultérieurement sa part de marché de la puissance de hashage et sa consommation énergétique. Quelque

<sup>31</sup> Cambridge Index [parle](#) de construire une meilleure estimation (*best-guess*)

<sup>32</sup> Le minage de CPU et de GPU représente considérablement moins de 0,000000001% de la puissance de minage et ils sont totalement inefficaces et ne sont pas utilisés activement dans le minage. Nous ne considérerons que le minage CPU et GPU dans nos recherches pour compiler les données minières initiales au cours des 5 à 6 premières années de minage PoW

soit un temps  $t$  donnée, nous pouvons modéliser tous les attributs des mineurs en utilisant cette approche :

$$Miners(t) \rightarrow \begin{cases} M_{model} = \{m_0, m_1, \dots, m_{N_t}\} \\ M_{release} = \{r_0, r_1, \dots, r_{N_t}\} \\ M_{hash} = \{h_0, h_1, \dots, h_{N_t}\} \\ M_{power} = \{p_0, p_1, \dots, p_{N_t}\} \\ M_{efficiency} = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{N_t}\} \\ M_{count} = \{C_0(t), C_1(t), \dots, C_{N_t}(t)\} \end{cases}$$

Pour chaque mineur, nous considérons l'ensemble  $m_i \rightarrow \{r_i, \alpha_i, h_i, p_i, \pi_i, C_i(t)\}$  où  $C_i(t)$  est le compte du modèle  $m_i$  à un instant  $t$  donné, en ligne et contribuant au PoW de la blockchain Bitcoin. L'espérance de vie des mineurs ASIC est de 3 à 5 ans et nous avons vérifié cette information directement auprès de l'industrie de minage. Ainsi, dans notre recherche, nous avons comptabilisé  $N_{max} = 91$  modèles de mineurs dont la date de sortie se situe entre juillet 2014 et mai 2022 ( $\alpha_{max} \leq 5$  ans). D'autres modèles plus anciens peuvent être considérés en toute sécurité hors du réseau Bitcoin aujourd'hui (ou sans impact sur les résultats).

$$Miners \rightarrow \begin{cases} N_{max} = 91 \text{ models} \\ r_i \in [r_{min}, r_{max}] = [2014.07, 2022.03] \\ \alpha_i = t - r_i, \alpha_{max} \approx 60 \text{ months} \\ h_i \rightarrow TH/s \\ p_i \rightarrow Watt \\ \pi_i \rightarrow Watt/TH \\ C_{m_i}(r_{min}) = C_{m_i}(r_{max}) \approx 0, \forall i \in [1, 91] \end{cases}$$

La façon la plus précise d'évaluer la consommation d'énergie de la PoW Bitcoin est de calculer le nombre le plus précis  $C_i(t)$  des unités installées pour chaque modèle au fil du temps. Mais comme les données de vente ne sont pas disponibles et que la Blockchain n'enregistre pas le modèle de minage, cette approche semble impossible. Pourtant, nous avons constaté que la variation du taux de hashage total  $\Delta H_t$  de Bitcoin peut nous donner un indicateur précis de la croissance ou décroissance de la puissance de hashage des mineurs installés.

$$\text{À tout moment } t \text{ du temps, } H(t) = \sum_{i=0}^{N_t} h_i C_i(t). \quad [15]$$

Où  $H(t)$  est le taux de hashage disponible sur Bitcoin à l'instant  $t$ . Ces données peuvent être lues de manière fiable sur la blockchain de Bitcoin en temps

quasi réel. La puissance de hashage est estimée à partir du nombre de blocs minés au cours des dernières 24 heures et de la difficulté actuelle des blocs. Plus précisément, étant donné le temps moyen  $T$  entre les blocs minés et une difficulté  $D$  sur Bitcoin PoW, le taux de hashage estimé par seconde  $H$  est donné par la formule suivante  $H(t) = 2^{32} \times \frac{D}{T}$ , où  $T \approx 10$  min, mais dans le calcul du taux de hashage on utilise la valeur réelle sur la blockchain et cela peut être par exemple moins de 10 min. Donc le taux de hashage bien que calculé, est extrêmement précis pour notre travail jusqu'à des périodes de 10 minutes, alors que nous travaillons sur des taux et des chiffres mensuels sur une période de 13,3 ans.

La difficulté de hashage est une mesure de la difficulté de miner un bloc de Bitcoin, ou en termes plus techniques, de trouver une valeur d'un hashage inférieur à une grandeur cible donnée. Une difficulté élevée signifie qu'il faudra plus de puissance de calcul pour miner le même nombre de blocs, ce qui rend le réseau plus sûr contre les attaques. L'ajustement de la difficulté est directement lié à la puissance de calcul totale dans le taux de hashage total (TH/s). Lorsque le taux de hashage de Bitcoin augmente ou diminue de  $\Delta H(t)$ , cela est dû au fait que le parc matériel installé a augmenté dans le compte total d'unités de minage sur tous les modèles  $m_i$ . Cette augmentation ou cette diminution du delta sera répartie entre les anciens et les nouveaux matériels libérés.

Ces considérations conduisent à une équation comportant jusqu'à 91 variables ou plus, ce qui rend impossible le calcul de chaque  $C_i(t)$ . Pourtant, le taux de hashage total est distribué sur les modèles disponibles  $N_t$ . Ce fait peut nous conduire à un premier calcul moyen mais nous pouvons réaliser une bien meilleure évaluation. Nous notons que pour  $t \leq \text{juillet } 2014$  tous les anciens mineurs ne sont plus en ligne, il est donc permis de les estimer comme un seul modèle virtuel unifié. Appelons  $m_0$  le mineur virtuel matériel à partir de  $r_0 = r_{min} = 2009.02$  (mois 1 de la mise en ligne de Bitcoin). Comme ce mineur ASIC virtuel peut être considéré comme seul sur le marché jusqu'à  $r_1 = 2014.07$  (mois 68), il est maintenant facile de calculer le nombre de  $m_0$  pour toute la période  $C_0(t) \forall t \in [1, 68]$  en utilisant :

$$C_0(t) = \frac{H(t)}{h_0} \forall t \in [1, 68] \text{ mois au total} \quad [16]$$

Dans l'exemple ci-dessus, nous voyons que dans ce modèle, le  $m_0$  virtuel avec son 0,18 TH/s est autorisé à avoir un nombre d'unités inférieur à un (*jusqu'en février 2011*) puisqu'il simule tous les anciens modèles : 2 modèles ASIC, quelques modèles GPU et CPU. Et puisque  $m_0$  et tous ces modèles combinés ne sont plus en ligne, ça nous donne un début des calculs très précis sur lequel s'appuyer pour les prochains modèles à comptabiliser.

Les équations de  $m_0$  sont donc les suivantes :

$$m_0 \rightarrow \begin{cases} N_{max} = 1 \text{ model} \\ r_0 = r_{min} \in [2009.02, 2019.05] \\ \alpha_{max} \approx 120 \text{ months} \\ h_0 = 0.18 \text{ TH/s} \\ p_0 = 360 \text{ W} \\ \pi_0 = 2000 \text{ W/TH} \\ C_0(t) = \frac{H(t)}{h_0} \\ \forall t \in [1, 160] \text{ months} \end{cases}$$

Notez qu'exceptionnellement l'âge maximum du  $m_0$  est de 10 ans au lieu de 5 ans. Il est légitime de permettre à de nouveaux modèles de le remplacer sur le marché et parce que le dernier mineur émis il y a plus de 5 ans est le Bitmain AntMiner S1 avec le modèle 0.18TH/s et sorti en novembre 2013, ce modèle est utilisé comme  $m_0$  unifiant tous les anciens matériels inefficaces ASIC, GPU et CPU. Dans le même temps, le taux de hashage total du Bitcoin était des millions de fois plus faible, passant de  $H(1) = 0,0000044$  TH/s en 2009.02 à  $H(58) = 2\,559$  TH/s en 2013.11, soit une augmentation de 581 millions de fois en 4 ans environ. Cela confirme notre approche pour  $m_0$  et sa capacité de 0,18TH/s comme modèle unifié de tout le matériel ancien qui n'est plus en ligne depuis 2019.05.

Par exemple, le nombre virtuel d'unités de minage est de :

$$C_0(20) = \frac{H(20)}{h_0} = \frac{0.00417 \text{ TH/s}}{0.18 \text{ TH/s}} = 0.0232 \text{ unités}$$

$$C_0(61) = \frac{H(61)}{h_0} = \frac{15,943 \text{ TH/s}}{0.18 \text{ TH/s}} = 88,570 \text{ unités}^{33}$$

Une fois qu'un nouveau modèle de minage  $m_1$  est lancé sur le marché, il faut au moins 1 à 3 mois pour qu'il fasse partie de la puissance de hashage de la blockchain, et il suivra un taux de croissance remplaçant progressivement la part de marché et le taux de hashage de  $m_0$  jusqu'à ce qu'il quitte le parc installé de mineurs et soit mis hors ligne ~60 mois (5 ans) plus tard. En utilisant sa durée de vie, il partagera la puissance de hashage avec des modèles plus récents  $m_i$  lancés après son entrée sur le marché.

Comme les ventes ne sont pas connues et que la distribution moyenne n'est pas assez précise, nous avons démontré que la variation du taux de hashage du Bitcoin  $\Delta H_t$  est directement proportionnelle à la somme de tous les  $\Delta C_m(t)$  qui correspond au total des mineurs installés et en tenant compte des nouveaux matériels, moins les anciens mineurs mis hors ligne. Cela conduit à  $\Delta H_t = H_t - H_{t-1}$ ,  $\forall t \in [1, 160]$  mois étant directement proportionnel à :  $\Delta \text{Nombre}(\text{mineurs à } t)$  :

$$\sum_{i=0}^{N_t} C_i(t) - \sum_{i=0}^{N_t} C_i(t-1) = \sum_{i=0}^{N_t} \Delta C_i(t) \Rightarrow$$

$$\Delta H_t = \sum_{i=0}^{N_t} h_i \times \Delta C_i(t)$$

Et le nombre total d'unités de minage étant à un moment donné =  $\sum_{i=0}^{N_t} C_i(t)$  mineurs

Comme  $h_i$  et  $p_i$  sont donnés par les fabricants pour tous les modèles, nous devons trouver l'approche la plus précise pour calculer  $\Delta C_m(t)$  pour chacun des  $N_t$  modèles de mineurs à un instant<sup>34</sup>  $t$  donné. Si la distribution du nouveau matériel sur le marché est faite de manière égale (*ce qui n'est pas le cas*) et avant d'appliquer des améliorations supplémentaires à cette méthode, il est possible de résoudre une approximation des équations à plusieurs variables en utilisant la série basée sur l'information  $m_0$  :

<sup>33</sup> A ce stade, il s'agit d'un décompte de modèles virtuels. Les mineurs ici ne sont pas des nœuds. Les nœuds sont souvent des pools qui regroupent du matériel de minage de modèles ASIC. Au mois 61, nous pouvons estimer que 88 570 unités de minage étaient en ligne et participaient activement au PoW sur Bitcoin sans escale.

<sup>34</sup> L'overclocking des ASIC augmentera le taux de hashage et augmentera la consommation. Nous n'en avons pas tenu compte dans le modèle car l'efficacité énergétique reste relativement la même, n'affectant donc pas la consommation d'énergie totale de Bitcoin au total, mais nécessitant seulement un peu moins de matériel consommant un peu plus d'énergie mais se terminant par une consommation d'énergie équivalente globalement.

$$C_i(t) = C_{i-1}(t) + \frac{\Delta H_i}{N_i h_i} \text{ giving us } \Delta C_i(t) = \frac{\Delta H_i}{N_i h_i} \quad [17]$$

Trouvons maintenant une solution très précise pour cette équation. Pour  $m_0$ , le  $C_0(t)$  est déterminé avec 100% de précision grâce aux données de la blockchain jusqu'à la date de sortie de  $m_1$  at  $r_1 = 68$ . Jusqu'à  $\alpha_0 = 68$ ,  $m_0$  est le seul modèle virtuel de minage sur le marché. Cela nous permettra de calculer une première estimation (insatisfaisante) de toutes les unités de minage dans le temps. Afin d'améliorer ce modèle au maximum, nous devons trouver un modèle de distribution précis de l'utilisation de l'installation des unités de minage et de leur mise hors ligne. En économie et en physique, les nouveaux produits entrant sur un marché suivent globalement la loi de distribution normale<sup>35</sup>. Nous ne ferons pas une démonstration complète ici, mais cela a été vérifié pour de nombreux produits dans [la logistique](#) et voici une vérification logique rapide pour les produits de minage :

- ~ Dès qu'une nouvelle unité de minage est mise en marché, elle prend un certain délai pour être pré-vendue, vendue, fabriquée, stockée, expédiée et livrée, initiant ainsi le début de la forme de courbe en cloche avec une croissance exponentielle. Les informations sur le marché minier montrent un délai de 1 à 3 mois pour commencer une phase de pénétration du marché et de croissance de livraison.
- ~ Puis, une fois qu'elle devient largement disponible sur le marché, elle connaît une croissance relativement exponentielle en termes de ventes et d'installations avant que son taux de croissance ne décélère puis ne soit limité en raison de 2 facteurs : la saturation du marché, le rapport prix/puissance corrélés à  $\pi_i$  et l'arrivée de nouveaux modèles plus performants limitant la demande sur les modèles précédents.
- ~ Une fois que l'interaction de plusieurs modèles concurrents se produit, le modèle précédent ralentit sa croissance pour s'arrêter à une part de marché maximale, puis la courbe commence à s'inverser tandis que les nouveaux modèles croissent de manière exponentielle et que l'ancien modèle commence à sortir du marché ; le processus inverse est sensiblement symétrique,

jusqu'à ce que le même processus se produise en boucle pour les modèles les plus récents.

L'âge maximum d'un modèle  $m_i$  est en moyenne de 5 ans de fonctionnement à plein temps, ce qui nous donne une idée de l'étendue de la courbe de Gauss. Cette information importante est cruciale pour résoudre les équations complexes. Une courbe de distribution normale nécessite la modélisation de 2 variables :

$$\gamma_i(t) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad [18]$$

Où  $\pi = 3.14159265359...$  et  $e$  est une fonction exponentielle liée à la constante mathématique appelée nombre d'Euler  $e = 2.71828...$  Puis  $\sigma$  est l'écart type et  $\mu$  est la valeur moyenne de la distribution (médiane). Puisque nous savons que l'âge d'un mineur  $\alpha_{max} \approx 60$  mois, nous pouvons considérer que  $\mu_i \approx 30$  mois en moyenne pour tout mineur en PoW de Bitcoin.

Il nous reste à déterminer la valeur de  $\sigma_i$ . L'écart-type est une mesure de la dispersion d'un ensemble de modèles de mineurs  $m_i$ . Un faible écart-type indique que les valeurs ont tendance à être proches de la moyenne  $\mu_i = 30$  mois, tandis qu'un écart-type élevé indique que les valeurs sont réparties sur une plus grande plage. Puisque nous recherchons un  $\alpha_{max} \approx 60$  mois comme le grand écart de la courbe normale, cela se résout à un  $\sigma_i \approx 6.5 \text{ months } \forall i > 0$ . L'interprétation de cette valeur est qu'entre  $-\sigma_i$  et  $+\sigma_i$ , une période de 13 mois, 68,2 % des ventes totales du modèle  $m_i$  sont en production et en ligne sur la blockchain. Et entre  $-2\sigma_i$  et  $+2\sigma_i$  (période de 26 mois), 95,4% sont en production. Cela laisse une longue queue en dehors de la plage  $\pm 2\sigma_i$  (plus de 2 écarts types) pour l'entrée sur le marché et la sortie du marché sur les frontières de la courbe, et cela a été vérifié avec des centres de minage utilisant encore du matériel de près de 5 ans. Étant donné dans notre modèle  $\sigma_i = 6.5$  mois et  $\mu_i = 30$  mois, nous pouvons maintenant calculer le pourcentage de chaque vente et installation de produit. Nous devons maintenant corrélés le taux de pénétration du produit avec les différents modèles concurrents et déterminer le décompte le plus précis de chaque modèle dans le

<sup>35</sup> Aussi appelée loi de Laplace-Gauss, loi de Gauss ou simplement courbe en forme de cloche

temps, c'est-à-dire résoudre  $C_i(t), \forall i \in [1, N_t], \forall t \in [1, 160]$  mois.

Puisque le  $\Delta H_t = \sum_{i=0}^{N_t} h_i \times \Delta C_i(t)$ , et puisque nous savons la valeur  $C_0(t) \forall t \in [1, 68]$ , il est possible de calculer une à une les séries  $C_i(t)$  à partir de  $C_{i-1}(t)$  en utilisant la proportion des ventes de chaque modèle donnée par  $\gamma_i(t)$ . Nous avons démontré que la solution de cette équation complexe se trouve dans [19] ci-après.

$$H(t) = C_0(t)h_0 + \dots + C_i(t)h_i + \dots + C_N(t)h_N \Rightarrow$$

$$H(t) = \sum_{i=0}^{N_t} C_i(t)h_i$$

$$\text{Vérifiant que } C_i(t) = \frac{H(t)}{h_i} \times \frac{\gamma_i(t)}{\sum_{j=0}^{N_t} \gamma_j(t)} \forall i \in [0, N_t] \Rightarrow$$

$$H(t) = \sum_{i=0}^{N_t} \frac{H(t) \times \gamma_i(t)}{h_i \times \sum_{j=0}^{N_t} \gamma_j(t)} \times h_i, \text{ car } \sum_{j=0}^{N_t} \gamma_j(t) = 1$$

$$\Rightarrow H(t) = H(t) \times \sum_{i=0}^{N_t} \gamma_i(t),$$

Ce qui est vrai puisque  $\sum_{i=0}^{N_t} \gamma_i(t) = 1$ . Et cela démontre que

$$\Rightarrow C_i(t) = \frac{H(t) \times \gamma_i(t)}{h_i} \forall i \in [0, N_t] \blacksquare$$

$$m_i \rightarrow \begin{cases} C_i(t) = \frac{H(t)}{h_i \sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2} \\ \forall i \in [0, N_t], \forall t \in [1, 160] \\ \sigma_i = 6.5 \text{ months} \\ \mu_i = 30 \text{ months} \end{cases} \quad [19]$$

Cette importante équation  $m_i$  permet une description précise de la consommation d'énergie de Bitcoin basée sur le nombre exact d'unités de minage pour tous les modèles de mineurs. Les résultats de l'équation sont confirmés pour tous les calculs jusqu'à une précision de 0,00000001 à tout moment  $t$  pendant la période de 160 mois.

Bitcoin Blockchain Explorer indique que le taux de hashage actuel du réseau de mineurs est de  $\approx 204$  millions de tera-hashes par seconde<sup>36</sup>. Et nous pouvons lire sur la blockchain toutes les valeurs  $H(t)$  quotidiennes depuis le bloc de genèse.

Nous pouvons enfin calculer la consommation énergétique de Bitcoin PoW en utilisant :

$$P(t) = \sum_{i=0}^{N_t} p_i C_i(t) \quad [20]$$

Où  $P(t)$  est la puissance électrique du PoW de Bitcoin en Watt au temps  $t$ . Nous avons pu calculer le nombre d'unités de minage installées pour 160 mois pour chaque modèle  $m_i$ . Voici les valeurs actuelles à  $t = 160$  mois.

$$H(160) \approx 204 \times 10^{18} \text{ H/s} \quad [21]$$

$$NbTotal_M(160) = 3,990,685 \text{ mineurs} \quad [22]$$

$$E_{Bitcoin}(160) \approx 88.95 \text{ TWh/yr} \pm \epsilon \quad [23]$$

$$\text{Nombre de modèles de mineurs cumulés} = 92 \quad [24]$$

$$\text{Modèles de mineurs actuels en ligne} = 80 \text{ modèles} \quad [25]$$

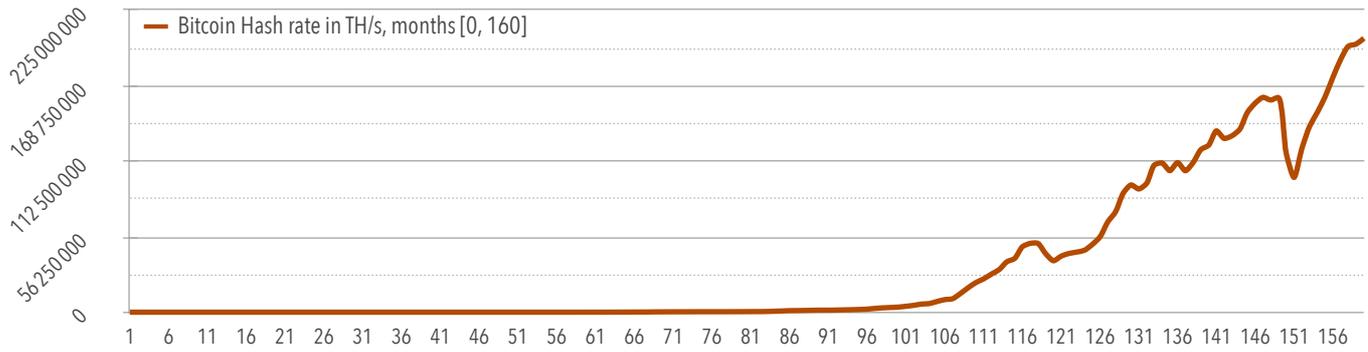
$$\pi_M = 49.7 \text{ W/TH moyenne des mineurs actuels} \quad [26]$$

Pour voir l'évolution de l'efficacité énergétique de la PoW au cours du temps, voir le graphique  $\pi_{PoW}$  dans le diagramme [D5] ci-dessus.

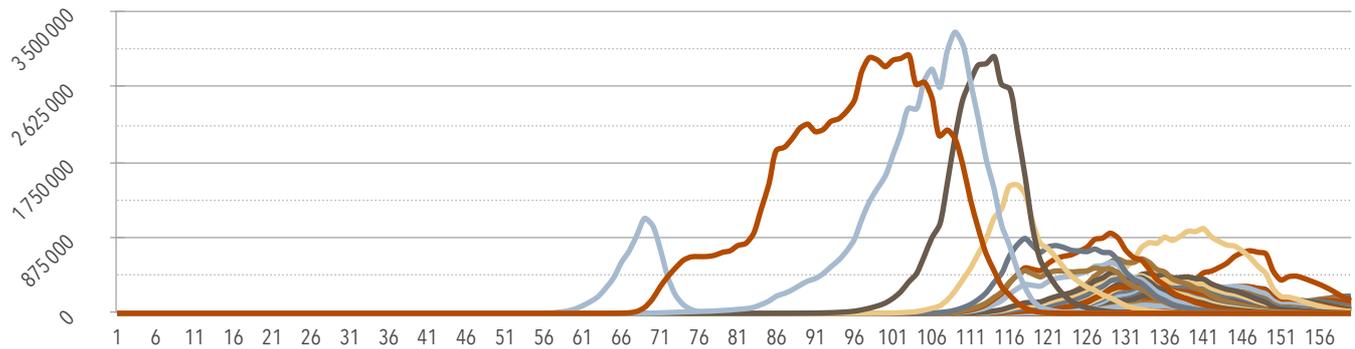
L'importance du décompte du matériel par modèle est qu'il nous a permis de calculer qu'il y a  $\approx 4$  millions d'unités de minage des différents modèles aujourd'hui dans le monde regroupés dans environ 15.636 nœuds Bitcoin atteignables. Notez que notre approche ne nécessite aucune cartographie par pays et n'utilise en aucun cas directement ou indirectement la tarification de l'électricité.

Puisque la puissance d'un matériel est déterminée par le fabricant et vérifiée par la communauté des mineurs, nous pouvons considérer que sa valeur est précise avec une marge d'erreur très faible (moins de 2%). La marge d'erreur de la consommation énergétique de Bitcoin peut provenir de 2 sources :

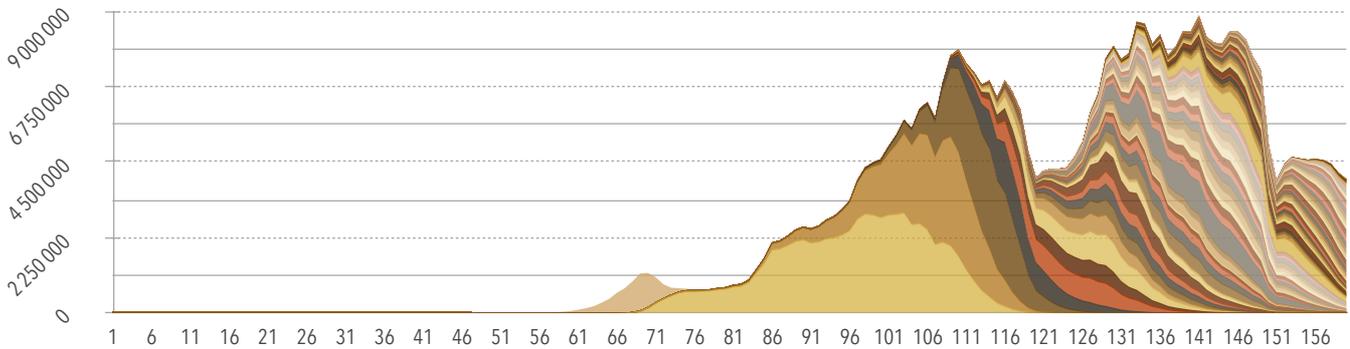
<sup>36</sup> Ca correspond à 204 000 000 000 000 000 000 hashes/seconde



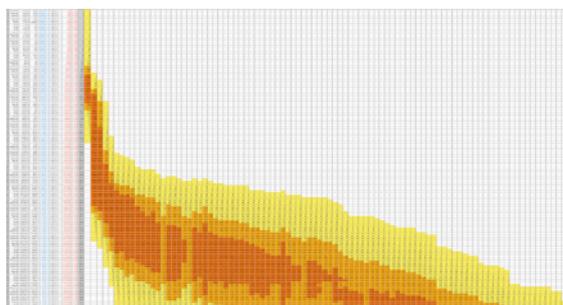
[D1] Bitcoin hash rate in according to the Blockchain data



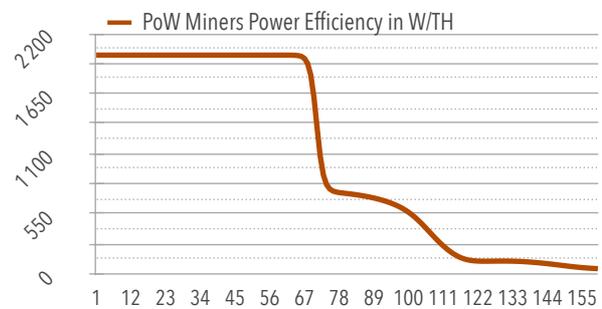
[D2] Count  $C_i(t)$  of each one of the 92 ASIC miner models contributing to PoW over  $[0, 160]$  months



[D3] Total count of mining units over time (accumulation of the count for the 92 ASIC miner models) over 160 months



[D4] Calculation of  $C_i(t)$ : Count of miners for 92 ASIC models (left to right columns) in  $[0, 160]$  months (top down rows)



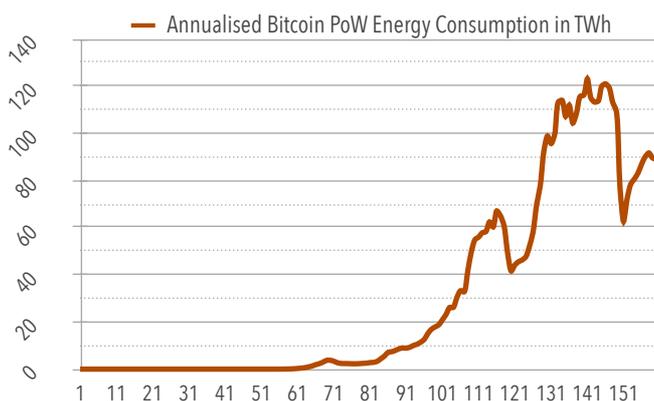
[D5] Evolution of PoW total miners Power Efficiency  $\pi_i$  of all models overs 160 months  
See [26]

- ~ Notre estimation de  $C_i(t)$  et la précision de la  $p_i$  en *Watts* fournie par le fabricant<sup>37</sup>. Dans notre approche, nous n'avons pas besoin de considérer que le taux de temps de fonctionnement du matériel par an ( $\sim 99,9\%$ ) puisque nous avons calculé la consommation exacte du temps de fonctionnement réel des mineurs ASIC.
- ~ Varier les valeurs de  $\sigma_i$  et  $\mu_i$  génère des résultats s'écartant de  $\epsilon < 5\%$  confortant la précision de nos calculs. En revanche, les marges d'erreur de l'indice de Cambridge sont très importantes avec  $\epsilon_{CBECI} \in [-63.2\%, 146.4\%]$ .

Ceci permet de mettre à jour notre [23] à :

$$E_{Bitcoin}(2022.04) = 88.95 \text{ TWh/an} (\epsilon < 5\%) \quad [23]$$

Notez également que les 92 modèles de minage



[D7] *Energy consumption of Bitcoin PoW between [0, 160] months*

ASIC utilisés ne sont pas tous destinés uniquement au minage de Bitcoin ; beaucoup d'entre eux ne sont pas assez efficaces pour Bitcoin et sont donc surtout utilisés pour miner d'autres cryptomonnaies. Sur la base de ce seul principe, nous pouvons voir que le [23] est en fait une borne supérieure. Et si nous prenons en compte cet argument, les mineurs avec un  $\pi_i$  plus élevé seront plus utilisés pour le minage de

Bitcoin et cela améliorera encore la consommation énergétique réelle de Bitcoin.

Hypothétiquement, si toutes les unités de minage étaient remplacées par l'ASIC le plus efficace du marché (ayant le plus faible  $\pi_i$  possible aujourd'hui), la consommation d'énergie de Bitcoin tomberait à  $\pi_i = 29.5 \text{ W/TH}$  au lieu de [26]. Cela conduit au même travail  $H(t)$  avec une forte baisse de la consommation d'énergie de Bitcoin de 40% à seulement 52,8 TWh/an. Il est donc possible de faire fonctionner tout le réseau Bitcoin avec 52,8 TWh/an aujourd'hui sans déclencher l'ajustement du taux de hashage requis pour le PoW. Notez qu'il ne s'agit pas d'une limite inférieure réelle mais de l'énergie minimale requise aujourd'hui et que le matériel utilise en réalité 88,95 TWh/an pour effectuer le même travail<sup>38</sup>.

$$\text{Consommation minimale possible aujourd'hui} \\ E_{Min}(Bitcoin) = 52.8 \text{ TWh/yr} \quad [23a]$$

### COMPARER AU NIVEAU D'UNE TRANSACTION

Nous pouvons conclure que le système de cryptopaiement du Bitcoin PoW consomme au moins  $\sim 56$  fois moins d'énergie que le système monétaire et de paiement électronique classique.

$$E_{classique} \approx 56 \times E_{Bitcoin} \quad [27]$$

Comparons maintenant le *travail* et la *puissance* des 2 systèmes. Il n'est pas suffisant de comparer seulement la consommation totale d'énergie des deux systèmes. Nous devons comparer maintenant *l'efficacité énergétique* au niveau de la transaction unitaire et la *quantité* de *travail* et de puissance impliquée dans ces 2 systèmes.

Commençons par comparer la consommation d'énergie au niveau d'une seule transaction. Pour le Bitcoin, la taille actuelle des blocs se situe entre 1 Mo et 1,52 Mo et accueille aujourd'hui environ 2.591

<sup>37</sup>Notez que l'overclocking des mineurs ASIC peut améliorer la capacité de taux de hashage et augmenter la valeur de consommation d'énergie requise de l'unité de mineur, mais l'efficacité énergétique reste relativement constante, ce qui n'affecte pas le résultat final, en particulier que nous sommes tous liés par le taux de hashage total de Bitcoin. Cela peut donc produire une variation inférieure aux marges d'erreur de notre  $C_i(t)$

<sup>38</sup>Notez également que la consommation d'énergie de déplacement des employés qui opèrent les  $\sim 15\,636$  nœuds est négligeable par rapport aux 46 millions d'employés des banques sans compter le nombre très élevé d'employés des fournisseurs de services de paiement. De plus, la majeure partie du travail du gestionnaire de nœuds est effectuée à distance dans le cadre de la surveillance et de la télémaintenance. Nous n'avons pas inclus l'entretien physique des opérations coté bancaires et du Bitcoin car il est désavantageux par rapport au système de paiement classique.

transactions par bloc. Un bloc Bitcoin a maintenant une taille maximale théorique de 4 Mo et une taille maximale plus réaliste de 2 Mo<sup>39</sup>. La taille exacte dépend des types de transactions. Ainsi, la capacité maximale de traitement en masse par bloc peut être d'environ ~10 380 Tx/bloc. Ce résultat est obtenu en utilisant une taille variable d'une transaction Bitcoin entre 303 et 454 Ko/Tx (de la médiane à la moyenne). Nous avons calculé que Bitcoin peut traiter jusqu'à 544.879.300 transactions par an et qu'il traite actuellement environ 136,22 millions de transactions par an (fonctionnant à 24% de sa

$$Count_{current}(BitcoinTx) \approx 136.22 \times 10^6 Tx/yr \quad [29]$$

$$Count_{max}(BitcoinTx) \approx 544.88 \times 10^6 Tx/yr \quad [30]$$

$$Peak_{real}(BitcoinCapacity) \approx 4.32 Tx/s \quad [31]$$

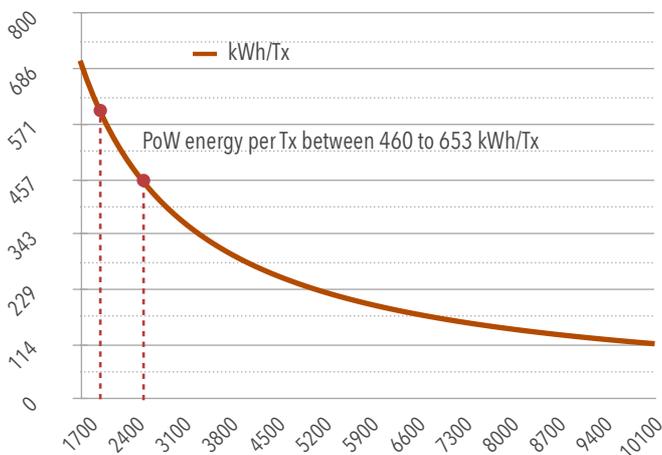
$$Peak_{max}(BitcoinCapacity) \approx 17.3 Tx/s \quad [32]$$

$$Energie_{moy}(1Tx) \approx 653 kWh/Tx \quad [33]$$

$$Energie_{min}(1Tx) \approx 115 kWh/Tx \quad [34]$$

$$E_{PoW}(160) \approx 1.180.220 kWh/block \text{ (today)} \quad [33a]$$

$$P_{PoW}(160) \approx 10,154 GW \quad [33b]$$



[D7a] Consommation d'énergie actuelle d'une seule transaction Bitcoin utilisant PoW en kWh par Tx par rapport au nombre de Tx par bloc dans [1700, 10100] Tx/bloc

capacité). Ainsi, en moyenne, une seule transaction Bitcoin nécessite aujourd'hui 653 kWh mais pourrait être exécuté avec 115 kWh/an avec une plus grande adoption du Bitcoin dans les cryptopaiements.

Notez que [33a] est obtenu grâce à la puissance totale actuelle de PoW soit 10,154 GW dans [33b] et un temps médian de confirmation de bloc actuellement faible = 6,974 minutes/bloc au lieu de 10 minutes/block.

La puissance minimale par transaction Bitcoin peut se produire lorsque la capacité maximale d'un bloc est utilisée. Notez que [33] et [34] ne peuvent pas être extrapolés à des volumes plus importants car les transactions Bitcoin sont regroupées en blocs et un seul bloc peut contenir jusqu'à ~10K Tx. Le système de paiement monétaire actuel est au moins 5.775 fois plus important que Bitcoin en termes de volumes de transactions de paiement [30] et [10c], et a eu 60 ans de plus pour être optimisé et passer à l'échelle, mais il consomme ~56 fois plus d'énergie que Bitcoin fonctionnant en PoW.

Comparer l'efficacité énergétique par transaction des deux systèmes concurrents n'est pas un calcul direct du nombre total de transactions par an sur la consommation totale d'énergie. Bien que cela puisse sembler logique de comparer l'énergie consommée sur une seule transaction, le faire est incomplet car cela reviendrait à comparer des pommes et des oranges. Une transaction en Bitcoin et une transaction dans un système classique ne comportent pas le même nombre d'étapes, de conditions préalables et, surtout, ne sont pas réglées au même moment. Une transaction en Bitcoin est réglée en temps quasi réel en 10 minutes en moyenne<sup>40</sup>. Alors que dans une transaction de paiement classique, le règlement intervient entre 1 et 5 jours ouvrables, c'est-à-dire jusqu'à 7 jours<sup>41</sup>. La plupart des transactions locales sont généralement réglées en T+2, c'est-à-dire en 2 jours. Les paiements transfrontaliers sont réglés plus lentement en raison d'obstacles supplémentaires. **Les paiements classiques peuvent être réglés**

<sup>39</sup> Cette différence est due au fait que Bitcoin utilise désormais une "limite de poids" maximale d'un bloc. Le poids du bloc est une mesure de la taille d'un bloc, mesurée en unités de poids. Le protocole Bitcoin limite les blocs à 4 millions d'unités de poids, limitant le nombre de transactions qu'un mineur peut inclure dans un bloc. Quatre millions d'unités de poids équivalent à 4 Mo de données, ce qui signifie que la taille maximale d'un bloc est désormais de 4 Mo.

<sup>40</sup> Le temps de confirmation médian actuel sur Bitcoin Blockchain est récemment tombé à environ 7 minutes. La difficulté de minage de Bitcoin PoW est ajustée tous les 2016 blocs (toutes les 2 semaines environ) afin que le temps moyen entre chaque bloc reste de 10 minutes.

<sup>41</sup> Swift GPI n'a pas encore été adopté mais permettra à l'avenir des transactions transfrontalières plus rapides en quelques minutes également. L'expérimentation de la monnaie numérique de la banque centrale (Donbar Project by BRI) a testé une approche différente utilisant directement plusieurs MNBC entre les banques centrales. Mais ces systèmes ne sont pas encore en production. Voir aussi Swift [How long do wire transfers take?](#)

**jusqu'à 1008 fois plus lentement qu'une transaction en Bitcoin.** C'est le cas par exemple des paiements transfrontaliers. Ils représentent  $\approx 2\%$  du total des paiements dans le monde mais augmentent extrêmement vite en raison de l'adoption massive des paiements en ligne et des paiements mobiles avec les places de marché mondiales et la force de travail de l'immigration. Dans le cas plus large, on peut considérer que la durée de règlement d'une opération de paiement classique est en moyenne de 2 jours. **Une transaction de paiement classique est en moyenne 288 fois plus lente qu'une transaction sur Bitcoin.** [35]

En physique, la puissance est l'énergie consommée pendant une durée donnée, et le travail est une forme de changement d'énergie qui, divisé par le temps, donne la puissance. Comparons donc le *travail* effectué par Bitcoin et le *travail* effectué par le système bancaire et de paiement électronique classique, en se basant sur [0]

Le système électronique classique consomme au moins 1,58 kWh/transaction en moyenne (voir [12] et [10c]) mais effectue le *travail* en  $\sim 48$  heures en moyenne. Bitcoin consomme entre 115 kWh/transaction et 653 kWh/transaction actuellement et termine les transactions en  $\sim 10$  minutes en moyenne (actuellement en 418,44 secondes).

Il est également important de comprendre la signification de la moyenne de 1,58 kWh/transaction pour le système classique. Cette moyenne est basée sur les 3,146 milliards de transactions par an que le système bancaire et de paiement traite en consommant 4.981 TWh/an (voir [10c] et [12]). Elle est calculée comme l'estimation de la limite inférieure après plusieurs simplifications. Il est clair que le système bancaire dans son ensemble peut parfois consommer beaucoup plus ou beaucoup moins d'énergie par transaction en fonction de la nature différente de l'acte de paiement : transfrontalier, par carte ou sans carte, paiement instantané, transaction en espèces, transactions à proximité ou en ligne. De même, il est important de comprendre que la seule estimation valable de la consommation d'énergie de Bitcoin est celle par bloc. Puisqu'un bloc peut contenir de 0 à 10 380 Tx, il consomme la même quantité d'énergie par bloc (voir [33a]). Par conséquent, la transaction Bitcoin minimale en PoW est actuellement  $P_{min} \approx 115 kWh/Tx$  et la moyenne mensuelle est  $P_{avg} \approx 653 kWh/Tx$ . Voir [34].

Première conclusion, **le Bitcoin n'est pas utilisé à son plein potentiel. Nous pouvons multiplier les volumes de transactions par 4 sans augmenter sa consommation énergétique.** La taille des blocs est aujourd'hui sous-utilisée et l'adoption du Bitcoin peut croître sans augmentation de l'énergie. Lorsque cette limite maximale sera atteinte, ce sera la capacité de volume la plus élevée que Bitcoin pourra gérer, et c'est pourquoi nous ne pouvons pas extrapoler la croissance de l'énergie pour la convertir en plus de débit au-delà de ce plafond. Bitcoin a résolu cette limite en introduisant le réseau Lightning au niveau de la couche 2 que nous couvrirons dans un prochain paragraphe.

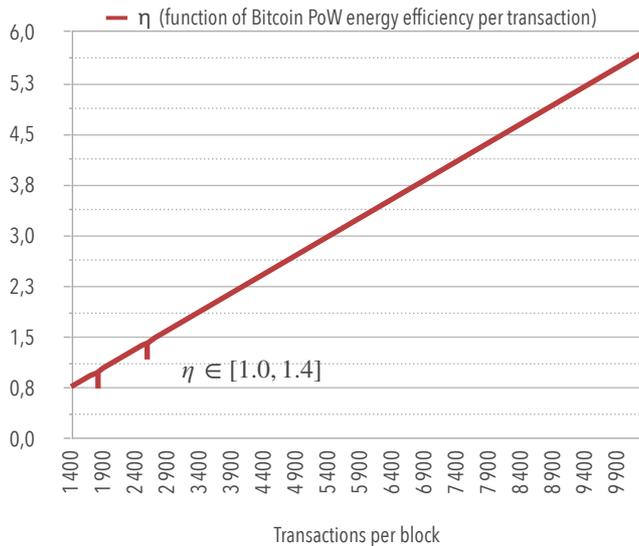
Sur la base de [0], nous avons défini que le même *travail* effectué par les deux systèmes consiste à opérer sur la *monnaie* un déplacement dans le *temps*, similaire au déplacement d'un objet physique dans l'espace. La méthodologie appropriée pour comparer des pommes avec des pommes est de comparer la consommation d'énergie par rapport au temps de règlement des 2 systèmes. Appelons **Efficiéne énergétique comparée** ou *efficiéne de conversion énergétique* ( $\eta$ ) un nombre sans unité obtenu comme un rapport du travail utile produit par un système de conversion énergétique par rapport à un autre système, ici le Bitcoin comparé au système monétaire et de paiement mondial.

$$\eta = \frac{P_c t_c^2}{P_B t_B^2} = \frac{\Delta W_c \cdot dt_c}{\Delta W_B \cdot dt_B} = \eta_e \times \eta_d = \frac{A_c}{A_B}$$

$$\text{Où, } \eta_e = \frac{\Delta W_c}{\Delta W_B} \text{ et } \eta_d = \frac{dt_c}{dt_B}.$$

Notez que  $dt$  est le déplacement dans le *temps* comme dans [0],  $e$  est pour l'énergie,  $c$  pour le système classique et  $B$  pour Bitcoin.  $\eta_e$ , est l'efficacité énergétique par transaction et  $\eta_d$ , est l'efficacité de la durée par transaction (distance dans le *temps*). Notez également que  $A = P \cdot t^2$  est appelé action en physique. L'action est la quantité de mouvement de l'opération multipliée par le déplacement qu'elle effectue dans le temps. Elle a pour dimensions l'énergie  $\times$  le temps, et son unité peut être le joule-seconde (comme la constante de Planck  $h$ ).

$$\text{Efficiéne Énergétique: } \eta = \eta_e \times \eta_d = \frac{A_c}{A_B} \quad [35]$$



[D8] PoW  $\eta$  efficacité énergétique par rapport au système classique, en partant du nombre le plus bas actuel de Tx/bloc jusqu'à la capacité de bloc maximale (avec le mélange actuel de modèles de mineurs)

Au niveau d'une transaction unitaire, Bitcoin est aujourd'hui  $\eta \approx 1.2 \times$  plus efficace en énergie que le système classique dans l'intervalle  $\eta_B \in [1.0, 1.4]$  [36]

$\eta_{max} = 5.7$  aujourd'hui [36a]

"Eta" ( $\eta$ ) peut être analysée comme l'efficacité énergétique ou l'efficacité d'action selon [35]. Il s'agit de l'efficacité temporelle multipliée par l'efficacité du travail ou le ratio d'action A par transaction des deux systèmes.

À sa capacité actuelle, Bitcoin en PoW peut utiliser 412 fois plus d'énergie par transaction que le système électronique et peut terminer le même travail 413 fois plus vite avec un temps médian de confirmation de bloc de 418,44 secondes aujourd'hui ( $\sim 7$  minutes/bloc). À un rythme de bloc de 10 minutes, Bitcoin en PoW est au moins 288 fois plus rapide.

**Nous pouvons conclure que la couche principale de PoW de Bitcoin est aujourd'hui  $\eta_{Bitcoin} \approx 1,2$  fois plus efficace en énergie que le système électronique au niveau d'une transaction unitaire.** Pourtant, cette efficacité n'est pas encore utilisée à son plein potentiel aujourd'hui. Si l'adoption du Bitcoin double alors  $\eta = 2$  devenant deux fois plus efficace que le système classique au niveau d'une seule transaction. Aujourd'hui, à la taille actuelle des blocs et si les blocs sont remplis au maximum de leur capacité, alors  $\eta_{max}$  offre une

efficacité énergétique 5,7 fois meilleure que le système classique. Dans le futur, les anciens modèles de mineurs seront certainement remplacés par de nouveaux modèles plus efficaces et sans augmenter le taux de hashage ni le nombre de transactions par bloc,  $\eta_{Bitcoin}$  sera  $\approx 6,71$  fois plus efficace par transaction en se basant uniquement sur le PoW. Alors 52,8 TWh/an seraient consommés par le PoW au lieu de 88,95 TWh/an aujourd'hui, voir [23a].

	Energy	Capacity	Tx Energy	Time	Efficiency
	TWh/yr	Tx/yr	kWh/Tx	Min	$\eta$
Classic	4981	3146 milliards	1,58	2880	<b>1</b> $\times$
Bitcoin Current	89	133 million	653	$\sim 7$	<b>1,2</b> $\times$
Bitcoin PoW	89	544.88 million	115	$\sim 7$	<b>5,7</b> $\times$

[T2] Efficacité énergétique de Bitcoin par rapport au système classique. (Moyenne actuelle de Bitcoin et capacité maximale actuelle de Bitcoin PoW)

### LIGHTNING VS PAIEMENTS INSTANTANÉS

Prenons maintenant en compte le réseau Bitcoin Lightning pour le comparer aux systèmes de paiement instantané (IP) qui améliorent considérablement, tous deux, la durée de la finalité d'une transaction dans les deux systèmes respectifs. Le réseau Lightning a la capacité notable d'augmenter de manière exponentielle le débit des transactions au-dessus de la couche 1 de Bitcoin, mais il le fait sans faire croître proportionnellement l'apport énergétique.

Il est important de comprendre d'abord comment fonctionnent les transactions sur le *Lightning Network*. Lightning exploite les canaux de transaction Bitcoin existants entre les payeurs et les payés en pair à pair, pour regrouper et transiter des transactions Bitcoin Lightning supplémentaires en une seule transaction Bitcoin PoW sur la blockchain principale. Par exemple, si Alice A veut payer à Georges G, 1000 satoshis (=0,00000001 bitcoin  $\approx 4$ \$ aujourd'hui) Lightning trouvera le canal ouvert le plus rapide qui exécute déjà des transactions le long de son chemin pour inclure le montant et effectuer le paiement

instantanément sur ce canal. De A à G la transaction peut être directe entre 2 nœuds s'ils ont un canal prépayé ouvert entre eux, sinon et la transaction doit aller à l'autre bout du globe, on suppose que  $\leq 6$  'sauts' (*hops*) sont nécessaires de A pour atteindre G :

$$A \xrightarrow[1]{hop} B \xrightarrow[2]{hop} C \xrightarrow[3]{hop} D \xrightarrow[4]{hop} E \xrightarrow[5]{hop} F \xrightarrow[6]{hop} G$$

Aujourd'hui, Lightning est en production et live, mais il n'en est qu'à ses débuts avec 36.852 nœuds (14.950 nœuds avec des IP publiques) et 83.601 canaux ouverts. La capacité du réseau Lightning est aujourd'hui de 141 millions de dollars avec une capacité moyenne de canal de 8.183\$ (0,213 BTC). Une transaction de paiement instantanée sur Bitcoin ne coûte que 1 satoshi comme frais de base médian et prend une fraction de seconde pour être finalisée.

Un nœud Bitcoin Lightning peut être modélisé à l'aide d'un raspberry pi avec un SSD habituellement utilisé par les nœuds. Une telle unité consomme environ 5W si les deux CPU sont occupés, ce qui n'est pas toujours le cas. Une transaction est traitée en moins d'une seconde à peu près en  $\approx 500$  *millisecondes* par transactions comme durée du traitement effectif. Compte tenu de l'estimation de 6 sauts :

$E_{L2}(\text{Lightning}) \approx 6 \times 5W \times 0,5s = 0,00416667Wh$  par transaction<sup>42</sup> ou 7,5W de puissance, si les transactions sont traitées en mode unitaire. Cela représente environ 480 000 fois moins d'énergie qu'une transaction de paiements classique.

$$E_{L2}(\text{Lightning}) \approx 0,000004167 \text{ kWh/Tx} \quad [35]$$

Comparons ce résultat à une transaction de paiement instantanée par exemple dans la zone euro (selon le schéma SCTInst du SEPA).

Une transaction de paiement est initiée sur un compte bancaire en ligne en s'appuyant sur plusieurs serveurs bancaires qui assurent la conformité, le back-end bancaire en ligne, les couches 1 et 2 du core banking, les serveurs de paiements instantanés tels que le Payment as a Service PaaS et le serveur de paiements instantanés qui appelle le CSM pour joindre le système de paiement instantané de la banque centrale afin de vérifier d'abord la

joignabilité de la banque du bénéficiaire, faisant ainsi plusieurs appels parmi au moins 5 à 10 sauts, juste pour les contrôles de joignabilité.

Ensuite, si la joignabilité est assurée entre les banques du payeur et celle du bénéficiaire, l'ordre de paiement instantané est donné et le traitement passe par les mêmes sauts, sans compter celui sur la couche principale de la banque centrale (nous ne tenons pas compte des notifications du payeur et du bénéficiaire de l'exécution de la transaction, car elles sont sensiblement les mêmes pour Lightning). Le nombre total de sauts peut être d'environ plus de 20 sauts entre les serveurs poids-lourd des centres de données et les ordinateurs mainframes, en plus des systèmes centralisés de la banque centrale qui les relient tous par une architecture centralisée. Pour le système SCTInst de paiements instantanés de la zone euro, le mécanisme de compensation et de règlement CSM peut passer par un intermédiaire comme STET en France, qui relie les banques au système TIPS de la Banque centrale européenne. Notez également qu'une transaction de paiement instantané n'a pas toujours une finalité instantanée, elle garantit la finalité à l'avance puisqu'elle utilise des comptes miroirs au CSM des comptes des banques auprès des banques centrales. La finalité complète est parfois donc retardée, lorsque le système de la banque centrale n'est pas disponible.

Il convient de noter que la comparaison de Bitcoin Lightning avec les Faster Payments ou les systèmes de paiement instantané est une approche valide sans nécessairement tenir compte de la fermeture du canal sous-jacent sur Bitcoin core en utilisant PoW. La raison est qu'une transaction Bitcoin Lightning a une finalité instantané au niveau de la couche 2 et qu'il est possible de l'écrire plus tard sur la couche 1 de Bitcoin en PoW, à la fermeture du canal. De même, dire qu'un paiement instantané dans un système classique peut prendre 7 secondes au lieu de 48 heures est parfois faux car, en réalité, il faut dans certains cas 3 heures ou plus pour régler complètement avec la monnaie de la banque centrale, tandis que sur Bitcoin Lightning, la transaction est définitive après une fraction de seconde et, dans le pire des cas, elle peut prendre 10 minutes (en option) avec la fermeture d'un canal sur la Blockchain principale.

<sup>42</sup> C'est un coût énergétique minimal aujourd'hui sans compter les services à valeur ajoutée des smartcontracts au-dessus de Bitcoin Lightning qui deviendront possibles grâce aux nouveaux protocoles en cours de développement tels que TARO et Watchtowers.

Sur la base de l'analyse précédente de Lightning et des paiements instantanés, nous pouvons considérer que la consommation d'énergie des paiements instantanés est équivalente à la consommation d'énergie du même système classique vieillissant, puisqu'il utilise le même matériel et la même infrastructure bancaire, mais ne fait que donner la priorité et accélérer certaines parties du flux de transactions. En outre, le moyen de paiement en soi qu'est le paiement instantané n'est pas encore largement adopté dans le domaine des paiements à l'échelle mondiale, car il manque encore des services complémentaires tels que la demande de paiement (*Request to Pay*), le lien avec l'initiation du paiement par carte et les solutions d'acceptation des PdV. Enfin, le paiement instantané est aujourd'hui un paiement local et n'est pas disponible pour les transactions transfrontalières. D'autre part, Bitcoin Lightning est encore au début de son développement, avec certains problèmes comme des transactions bloquées qui sont annulées après un délai supérieur à une seconde. Comme nous le voyons, les deux innovations sont en concurrence mais ne sont pas encore stables à 100% et ne sont pas déployées à grande échelle.

En comparant le débit des paiements, nous avons vu dans [10c] que le système classique a une capacité de 3 146 milliards Tx/an, ce qui pourrait sembler correspondre à 99 759 Tx/s. Mais pour une grande partie, ces transactions sont des paiements de masse et non des pics de capacité unitaires. Notons à partir de [4d] que la capacité maximale aujourd'hui de l'autorisation des paiements par carte est limitée à  $\approx 48\,891$  Tx/s. À apport énergétique identique dans les deux systèmes, par rapport au Bitcoin, le Lightning Network peut gérer un million de transactions par seconde, dans un seul canal, soit 20,45 fois que le système classique et encore avec une vitesse de 345 600 à au moins 14 fois plus grande que les paiements instantanés<sup>43</sup>.

*Lightning est 14 × plus rapide qu'Instant Payment* [37]

Et la consommation totale d'énergie de Bitcoin et du Bitcoin Lightning sont sensiblement la même :

$$E_{L1L2}(\text{Bitcoin}) = E_{L1} + E_{L2} = E_{L1} + \epsilon_{L2} \approx 88,95 \text{ TWh/an}$$

Théoriquement, si l'on considère que le paiement instantané va être totalement adopté dans le monde entier, même pour les paiements transfrontaliers, la capacité maximale de montée en charge est estimée par Swift être limitée à 1000 transactions par seconde. Cela représente un débit maximal de 31,53 milliards Tx/an. Cela indique un plafond d'évolutivité pour les systèmes de paiement électroniques centralisés actuels, ce qui limite l'adoption des paiements instantanés à environ 1 % seulement des transactions de paiement mondiales actuelles. Afin d'augmenter cette limite, d'importants changements de serveurs et d'architecture sont nécessaires pour les systèmes bancaires, core banking, les services bancaires en ligne, les centres de paiement, Swift GPI ainsi que les systèmes des banques centrales.

Afin d'évaluer précisément l'efficacité énergétique moyenne totale d'une transaction de paiement instantané, nous pouvons omettre toute l'énergie liée aux espèces, aux transports de fonds et aux distributeurs automatiques de billets et ne conserver que la consommation d'énergie des services bancaires, des PSP et des services interbancaires. Ceci conduit à 3 860 TWh/an pour une capacité maximale de 31,53 milliards de Tx/an. Notez que cette réduction de la consommation énergétique totale signifie qu'il n'y a plus de billets de banque ni de pièces de monnaie, ce qui n'est pas réaliste puisque toutes les banques centrales promettent le contraire. Comme le paiement instantané (IP) ne peut pas remplacer toutes les transactions de paiement électronique, nous sommes obligés de maintenir l'énergie nécessaire au service des espèces. Nous considérerons que l'énergie supplémentaire nécessaire pour servir IP est négligeable.

$$\text{Energie}_{min}(\text{IP}) \approx 3860 \text{ TWh/an} \quad [38a]$$

$$\text{Energie}_{moy}(\text{IP}) \approx 4981 \text{ TWh/an} \quad [38]$$

$$\text{Energie}_{tx}(\text{IP}) \approx 158 \text{ kWh/Tx} \quad [39]$$

$$\text{Capacité}(\text{IP}) \approx 31,53 \text{ milliards Tx/an} \quad [40]$$

Il convient de noter que [38] n'est que théorique, car aujourd'hui les transactions transfrontalières ne sont pas prêtes pour le paiement instantané et le nombre total de transactions de paiement instantané est inférieur à la capacité maximale de [40]. L'énergie

<sup>43</sup> Ce qui techniquement n'est parfois pas définitif en 7 secondes et la finalité nécessite encore une compensation.

moyenne d'une transaction IP unique [39] se situe entre 120 et 158 kWh/transaction sur la base de [38a] et [38] respectivement et du maximum théorique actuel dans [40]. En appliquant la même méthode à une transaction Lightning, nous ne tiendrons pas compte de l'énergie de la couche 2 et de ses 0,000004167 kWh/transaction. Pour le Bitcoin, nous prendrons également les deux couches, ce qui conduit à :

Energie<sub>L1L2</sub>(Lightning)  $\approx$  88,95 TWh/an [41]

Energie<sub>Tx</sub>(Lightning)  $\approx$  0,00282059 kWh/an [42]

Capacité(IP)  $\approx$  31 540 milliards Tx/an [43]

## CONCLUSION

Aujourd'hui, lorsque nous transférons 1 dollar d'un payeur à un payé, il n'y a pas de transfert réel<sup>44</sup> et direct de valeur entre les deux. Cela est dû à la nature fragmentée du système monétaire électronique actuel. Ce qui devrait se produire lors de la transaction dans le système électronique est un changement de propriété de l'actif appelé *monnaie*, mais en réalité il s'agit d'une conversion entre monnaies de banques commerciales libellée dans la même unité et supervisée par la banque centrale.

Le paiement exécute une *destruction* de cette monnaie électronique privée conservée par la banque du payeur, puis une autre opération de *création* est effectuée pour un montant équivalent avec une autre monnaie électronique privée émise par la banque du payé. Le règlement de cette *destruction* et de cette *création* est réalisé par une transaction<sup>45</sup> distincte exécutée entre la banque du payeur et la banque du bénéficiaire en utilisant leurs propres comptes à la banque centrale.

Le bénéficiaire, bien qu'il ait reçu le paiement, n'aura jamais de droit direct sur celui-ci. Il s'agit d'un montant qu'il prête à sa banque, ce qui équivaut à une promesse : "Je te dois" ("*I owe you*" IOU). Sa banque lui doit cette somme d'argent auprès de la banque centrale. C'est une différence importante entre Bitcoin et le système monétaire classique. Une

transaction en bitcoin entre un payeur et un payé est un transfert direct d'un cryptoactif : le *Bitcoin* fonctionnant comme une cryptomonnaie sans avoir besoin d'un tiers de confiance. La nature de la cryptomonnaie Bitcoin est cryptographiquement différente. Il s'agit d'un jeton ou d'une valeur réelle et non d'une monnaie en tant que dette ou promesse ; au contraire, il s'agit d'une valeur finale avec une propriété directe de la valeur intrinsèque de l'actif, une caractéristique que le système de monnaie électronique n'offre pas systématiquement, sauf avec les billets et les pièces.

C'est pourquoi comparer Bitcoin à la monnaie électronique et aux systèmes de paiement ne revient pas à comparer des systèmes similaires à 100%. Pourtant, dans cet article, nous nous sommes efforcés de comparer leur promesse commune uniquement du point de vue de l'efficacité énergétique, en ignorant toutes les autres caractéristiques des deux systèmes. Par exemple, le Bitcoin est également une forme de monnaie programmable dont la chaîne de valeur et les participants sont moins complexes, ce qui permet de transformer en commodité l'ensemble du système de paiement classique et d'offrir des services supplémentaires tels que les smart-contrats et la programmabilité de la monnaie. En revanche, les paiements instantanés ne le sont pas et nécessitent des services supplémentaires tels que le système de demande de paiement (*Request to Pay*) et un lien avec un système de carte, qui ne sont pas encore intégrés dans le système classique.

Globalement, nos résultats prouvent que **Bitcoin utilise 56 × moins d'énergie que le système classique**, même sans l'inclusion de Lightning et des Paiements instantanés dans la comparaison et sans avoir à comparer avec tout autre mécanisme de consensus de cryptopaiements utilisant la preuve d'enjeu par exemple.

Aujourd'hui, au niveau d'une transaction unique, la preuve de travail de Bitcoin est en moyenne 1,2 × plus efficace en énergie qu'une transaction de paiement électronique classique et ce facteur peut atteindre ×5 avec l'adoption ou le remplacement naturel des anciennes unités de minage par du matériel plus efficace déjà disponible.

<sup>44</sup> L'argent liquide (billets et pièces) s'échange en effet directement entre Alice et Georges mais il ne s'agit pas d'échange direct d'argent à 100%. C'est un échange direct de la promesse centrale de la valeur faciale sur le papier ou la pièce garantie par la banque centrale. Il n'y a donc pas de valeur intrinsèque échangée instantanément.

<sup>45</sup> Cette transaction regroupe toutes les transactions d'Alice à Georges mais regroupées avec toutes les transactions entre ces 2 banques après compensation de leurs valeurs

Lorsque Bitcoin Lightning et les paiements instantanés du système classique sont inclus dans le benchmark, et en faisant l'hypothèse qu'ils sont utilisés à leur capacité maximale dans les deux systèmes, nous constatons qu'une transaction Bitcoin Lightning est en moyenne 345 000 fois plus rapide que le système classique et 14 fois plus rapide qu'une transaction de paiement instantané. En outre, **Bitcoin Lightning est beaucoup plus rapide que les paiements instantanés**, avec une capacité théorique de 31 000 milliards de transactions par an pour Lightning, contre 31 milliards de transactions par an pour les paiements instantanés.

Cette limitation de capacité est principalement due à la limitation du débit des systèmes transfrontaliers de type Swift à ~1000 transactions par seconde. Dans notre estimation, nous avons utilisé 1000 transactions par seconde comme maximum global pour les paiements instantanés, mais en réalité, différents systèmes régionaux ou nationaux peuvent être incapables d'atteindre cette capacité ; par exemple, on estime que le système de paiement instantané de la Banque centrale européenne (TIPS) ne traite en moyenne maximale que 500 transactions par seconde. Par conséquent, si les deux systèmes sont utilisés à leur capacité maximale, le coût énergétique d'une seule transaction de paiement instantané devient beaucoup plus élevé qu'un paiement classique et nécessite ~158 kWh/Tx.

Le Bitcoin s'adapte mieux et parvient à diminuer drastiquement sa consommation jusqu'à 0,00282 kWh/Tx sur ses 2 couches combinées (donc en incluant le PoW).

En conclusion, Lightning au niveau d'une transaction unitaire permet à **Bitcoin de devenir 194 millions de fois plus efficace en énergie qu'un paiement classique et jusqu'à 1 million de fois plus économe en énergie qu'un paiement instantané.**

Nous observons que le système classique est sur-optimisé pour consommer moins d'énergie par transaction afin d'opérer des milliers de milliards de transactions par an à une vitesse relativement lente entre 2 et 7 jours. Cette sur-optimisation et cette spécialisation le rendent fragmenté, fragile et moins capable de s'adapter aujourd'hui aux paiements instantanés. En comparaison, Bitcoin a un ratio de puissance en sortie plus élevé et il est capable d'évoluer très efficacement en utilisant le réseau Lightning, grâce à la couche PoW de sa Blockchain principale.

	Total Energy	Total Capacity	Tx Energy	Tx Duration	Comparing Tx Energy	Comparing Speed	Energy Efficiency
	TWh/yr	Tx/yr	kWh/Tx	Seconds	$\eta_E$	$\eta_S$	$\eta_{EE}$
Classical System †	4 981	3 140 milliards	1,58	172 800	1 ×	1 ×	1 ×
Bitcoin PoW Current	88,95	133 million	460 to 653	418,44	290,6 × to 412,5 ×	413 ×	1,2 ×
Bitcoin PoW Best Possible	52,8	545 million	97	600	61,2 ×	288 ×	4,71 ×
Instant Payment ‡	4 981	31,53 milliards	158	~7	99,8 ×	24 686 ×	247 ×
Bitcoin L1+L2 Lightning	88,95	31 540 milliards	0,00282	~0,5	0,0010576 ×	345 600 ×	† 194 million × ‡ 1 million ×

[T3] Chiffres d'Instant Payment & Lightning : les deux systèmes sont utilisés à leur capacité maximale pour démontrer tout leur potentiel et leur scalabilité. Hypothétiquement, chaque Tx est transformée sur son mode le plus rapide dans chaque système

## RÉFÉRENCES

“2020 Annual Review and Consolidated Financial Statements” — SWIFT Annual Review

“A Map of Forex Traders: Where Are the 9.6 million Online Traders?” — *brokernotes.co*, 2022

“Armored Vehicles Are Key to the Cash-in-Transit Industry” — *The Armoured Group*, 2022

“Assessing IBM's POWER8, Part 2: Server Applications on OpenPOWER” — *Johan De Gelas*, Sept 2016

“Average number of individuals employed per bank in Europe (EU28) in 2018, by country” — Statista

“Banknotes and coins circulation” — *ECB*, 2022

“Benchmarking Commercial Building Energy Use Per Square Foot” — *IotaComm*, August 20, 2020

“Bitcoin, totem & tabou — Que présage l'essor des cryptomonnaies ?” *Institut Sapiens*, Fev 2018

“Bitnodes estimates the relative size of the Bitcoin peer-to-peer network by finding all of its reachable nodes.”

“Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index” — *Cambridge (CBECI)*, 2022

“Circulation velocity and how you can influence it” — *De La Rue*, 2018

“Climat: des emails à l'e-book, l'impact du numérique n'a rien de virtuel” — *Science & Avenir*, Mars 2016

“Community Banks Get Creative With Unused Branch Space”, *Independentbanker.Org*, January 2, 2018

“Comparing Bitcoin & Lightning energy usage to the real world” — *Co-Authorred by Oliver Barratt & Danny Scott*, 2021

“Confirmed Transactions Per Day” — *blockchain.info*

“CZ Binance” — *twitter.com*, March 14, 2022

“Diebold Innovation Leads to World's Greenest, Most Power-Efficient ATM” — *prnewswire.com*, March 2014

“Electric trucks like the Tesla Semi are 'pointless both economically and ecologically,' according to a vehicle-tech expert” — *Johannes Kaufmann and Qayyah Moynihan, Business Insider Deutschland*, Apr 3, 2019

“En moyenne, en France, un trader gagne 1 million d'euros par an” — *lepoint.fr*, 2014

“Energy hogs: Servers vs. desktops vs. set-top boxes” — *Patrick Thibodeau*, JUL 6, 2011

“Energy Losses Due to Imperfect Payment Infrastructure and Payment Instruments” — *Oleksandr Melnychenko*, Oct 9, 2021

“Everything you need to know about cross-border payments” — *emerchantpay*, 2021

“Fourteen Facts about the US Penny” — *Design Life-Cycle*, 2014

“From Home to Work, the Average Commute is 26.4 Minutes” — *US Bureau of Transportation*, OCT 2003

“Gestion des stocks et loi normale” — *JY Baudot*

“Global POS Terminals and Wireless M2M Market Report 2021: POS Terminal App Stores are a Potential Game-Changer” — *Research and Markets*, December 2021

“Glossaire Des Cryptopaiements” — *France Payments Forum*, 2020

“Guidelines for the next generation of Real-Time Retail Payments Systems (RT-RPS)” — *Swift*, 2015

“How long do wire transfers take?” — *Swift*

“How Many Dollar Bills Are in Circulation?” — *TitleMax*, 2017

“How Many Watts Does An Air Conditioner Use?” — *Bardi*, 2021

“How much is the total power supply consumption of an ATM machine?” — *Quora*, 2019

“How Much Money Is In The World Right Now?” — *Go Banking Rates*, Feb 2022.

“How much power does a computer use? And how much CO2 does that represent?” — *energyguide.be*

“Identifying IT Markets and Market Size by Number of Servers” — *Applied Computer Research, Inc.*, 2011

“Le grand paradoxe – ou pourquoi le règne du cash est loin de s'achever” — *Terra.Nova*, 2021

“Leading banks in the United States as of December 31, 2021, by number of employees” — Statista

“Lightning Network Explorer” — *explorer.acinq.co*, 2022

“Loomis Our business” — *web.archive.org*, 2014

“Loomis vs Brinks Comparison” — *macroaxis.com*, 2022

“Miners profitability” — *asicminervalue.com*

“Money Minting - The process of producing coins”, *CFI*, 2022

“Number of credit, debit and prepaid cards in circulation worldwide from 2017 to 2021, with forecasts for 2023, 2025, and 2026” — Statista

“Number of individuals employed by credit institutions in Europe (EU28) from 2009 to 2019” — Statista

“Real-Time Lightning Network Statistics” — *LML.com*,

“Répartition du nombre de salariés du groupe bancaire BNP Paribas dans le monde de 2017 à 2020” — Statista

“Scaling Renewable Energy” — *equinix.com*, 2022

“Share of cash transactions at POS (points of sale) in the euro area in 2016 and 2019” — Statista

“Société Générale Fact Sheet”, *Société Générale*, 2022

“Spatial proximity and distance travelled: Commuting versus non-commuting trips in Flanders” — *Kobe Boussaoui, Frank Willox*

“STET Fact Sheet” — *STET*, 2021

“Study on the payment attitudes of consumers in the euro area (SPACE)” — *ECB*, Dec 2020

“TARGET Instant Payment Settlement User Requirements” — *ECB*, 2017

“The carbon footprint of bitcoin” — *De Nederlandsche Bank, Juan Pablo Trespalacios and Justin Dijk*, 2021

---

“The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth” — *Johannes Sedlmeir, Hans Ulrich Buhl, Gilbert Fridgen, Robert Keller*, 2020

---

“The Hidden Expense of Energy — Print Is Costly, Online Isn't Free” — *The Scholarly Kitchen*, 2022

---

“The lifespan of money”, *Giesecke+Devrient GmbH*, 2022

---

“The State Of Lightning” — *Arcane Research*, Oct 2021

---

“Total Hash Rate (TH/s)” — [blockchain.info](https://blockchain.info)

---

“United States Data Center Energy Usage Report” — Shehabi et al, 2016; Shehabi et al, 2018

---

“Visa Data Centers: The engine rooms of Visa's global commerce network”, *Visa*, 2017

---

“Visa Fact Sheet” — *Visa*, 2022

---

“Visa Green Bond Report” — July 2021

---

“What is Energy and How Much do You Use?” — *Sustainability Exchange*, 2022

---

“What Is The Bitcoin Block Size Limit?” — *Bitcoin Magazine*, Aug 17, 2020

---

“What is the diesel consumption per kilometer of trucks?” — *Bridgestone Webfleet Solutions*, Feb 2020

---

“Which consumes more power: Banks or Bitcoins?” — *Zodhya*, April 2018

## À PROPOS DE L'AUTEUR

(\*) Michel KHAZZAKA (@kneisseh), fondateur de Valuechain un cabinet de conseil en cryptopaiements et de la chaîne YouTube Valuechain. Ingénieur électricité telecom et informatique spécialisé depuis plus de 17 ans dans la sécurité et l'innovation des paiements. Responsable de groupes de travail sur les cryptopaiements au sein de plusieurs entités représentatives françaises de paiement et interbancaires. Conférencier et formateur international, a donné des conférences et des cours sur 5 continents sur la blockchain et les cryptomonnaies, dont certains aux universités de la Sorbonne et de Paris Dauphine à Paris et à l'American University of Beirut.